



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NÁVRH MODULÁRNÍHO AKUMULAČNÍHO SYSTÉMU

DESIGN OF MODULAR ACCUMULATION SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Janek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Morávek, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Ondřej Janek

ID: 203237

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Návrh modulárního akumulčního systému

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše oblasti modulárních lithiových akumulátorů
2. Tvorba návrhu uspořádání modulárního akumulčního systému na bázi Li článků, včetně fyzického uspořádání jednotlivých modulů, volbu BMS systému s ohledem na požadované parametry
3. Tvorba dokumentace pro sestavení prototypu
4. Kalkulace nákladů pro navržené řešení

V rámci řešení se předpokládá spolupráce při sestavování prototypu ve společnosti fgFORTE s.r.o. zabývající se výrobou a výzkumem akumulčních systémů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího bakalářské práce

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 1.6.2021

Vedoucí práce: Ing. Jan Morávek, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá teoretickým uvedením do oblasti baterií a návrhem modulárního akumulačního systému. První tři části se zaměřují na teorii, ve které jsou rozebírány základní pojmy jako například akumulátory elektrické energie, rozčlenění lithiových článků se zaměřením na nejdůležitější LiFePO články a popis systému pro bezpečnost. Ve druhé části se jedná už o konkrétní návrh systému. Tedy návrh elektrického schématu, volbu článku a rozvaděče nebo vyčíslení celkového rozpočtu.

Abstract

The bachelor's thesis deals with the theoretical introduction to batteries and the design of a modular storage system. The first three parts focus on the theory, which discusses basic concepts such as electricity accumulators, the distribution of lithium cells with a focus on the most important LiFePO cells and a description of the safety system. The second part deals with the specific design of the system. That is, the design of the electrical diagram, the choice of cell and switchboard or the calculation of the total budget.

Klíčová slova

akumulátor, lithiové články, LiFePO, zapojení do série, zapojení paralelně, BMS, elektrické schéma, rozvaděč, modulární akumulační systémy

Keywords

accumulator, lithium cells, LiFePO, connection in series, connection in parallel, BMS, electrical diagram, switchboard, modular accumulation systems

Bibliografická citace

JANEK, Ondřej. Návrh modulárního akumulčního systému [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133355>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jan Morávek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Návrh modulárního akumulačního systému“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Janu Morávkovi, Ph.D. za výborné a potřebné vedení po celou dobu psaní této práce. Také bych rád poděkoval své milované manželce, která mi byla celou dobu oporou a s ní své dceři za motivaci.

Obsah

Seznam obrázků	9
Úvod	10
1 Základní pojmy	11
1.1 Nezávislé zdroje energie	11
1.2 Akumulátor elektrické energie	11
1.2.1 Olověné akumulátory	11
1.2.2 Vývoj	12
1.2.3 Princip	13
1.2.4 Využití	14
1.2.5 Vlastnosti	14
1.3 Konstrukce bateriových článků	15
1.3.1 Cylindrické články	15
1.3.2 Prizmatické akumulátorové články	16
1.3.3 Vakové články	17
1.4 Parametry elektrochemických článků	18
1.4.1 Nominální napětí	18
1.4.2 Kapacita	18
1.4.3 Životnost	18
1.4.4 Vybíjecí-nabíjecí proud	20
1.4.5 Počet cyklů	22
1.5 Základní charakteristiky	23
1.5.1 Nabíjecí charakteristika	23
1.5.2 Vybíjecí charakteristika	24
2 Lithiové články	26
2.1 Princip lithiových článků	26
2.2 Druhy lithiových článků	28
2.2.1 Články LCO ($LiCoO_2$)	28
2.2.2 Články LMO ($LiMn_2O_4$)	29
2.2.3 Články LTO (Li_2TiO_3)	29
2.2.4 Články LFP ($LiFePO_4$)	30
2.3 Skládání lithiových článků	32
2.3.1 Zapojení článků do série	32
2.3.2 Zapojení článků paralelně	32
2.4 Bateriové sestavy dostupné na trhu	33

3	Systém pro bezpečnost a správu baterií na bázi lithia (BMS)	36
3.1	Vzhled soustavy baterie	36
3.2	Popis funkce BMS	36
3.3	Parametry BMS	37
3.4	BMS dostupné na trhu	38
3.4.1	Freemans Freesafe FS-XT	38
3.4.2	Orion Jr. BMS	38
3.4.3	Energus Tiny BMS	39
3.4.4	LiBAL s-BMS	40
4	Návrh modulárního akumulárního systému	41
4.1	Volba článku	41
4.2	Návrh fyzického uspořádání baterií do rozvaděče	42
4.3	Volba stojanového rozvaděče	43
4.4	BMS	44
4.5	Elektrické schéma	47
4.6	Rozpočet	47
	Závěr	49
	Literatura	51
	Seznam příloh	55

Seznam obrázků

1.1	Schéma olověného akumulátoru [3]	12
1.2	Popis konstrukce elektrochemických článků [27]	15
1.3	Schéma Li-ion cylindrického článku [6]	16
1.4	Schéma prizmatického článku [6]	17
1.5	Vakový článek [6]	17
1.6	Nafouknutý vakový článek [6]	18
1.7	Náhradní schéma elektrochemického článku [9]	20
1.8	Vybíjecí křivky funkce C v čase [10]	21
1.9	Popis různých typů cyklů [9]	23
1.10	Průběh napětí, proudu a úrovně nabití při nabíjení akumulátoru Li-ion [21]	24
1.11	Vybíjecí charakteristiky napětí a kapacity v závislosti na vybíjecím proudu pro Li-ionový akumulátor [22]	25
2.1	Princip funkce lithiového akumulátoru [28]	27
2.2	Struktura katody LCO článku [13]	28
2.3	Struktura katody LMO článku [13]	29
2.4	Charakteristiky LTO baterie [13]	30
2.5	Charakteristiky LFP baterie [13]	31
2.6	Struktura $LiFePO_4$ [20]	31
2.7	Zapojení článků do série [29]	32
2.8	Paralelní zapojení článků [29]	33
2.9	Bateriový pack BYD Battery-Box Premium HVS 12.8 [30]	34
2.10	Bateriový pack RESU 10H - 400V lithium-ion storage battery [31]	34
2.11	Bateriový pack složený ze dvou bloků US2000B společnosti Pylon technologies [32]	35
3.1	Freemans Freesafe FS-XT [15]	38
3.2	Ewert Energy Systems – Orion Jr. BMS [15]	39
3.3	Energus Power Solutions – Tiny BMS [15]	39
3.4	Topologie s-BMS [36]	40
4.1	Rozměry článku [35]	42
4.2	Zapojení baterií v packu	42
4.3	3D model uložení packu ve stojanovém rozvaděči	43
4.4	Kótované rozměry stojanového rozvaděče [37]	44
4.5	Lokální kontrolní jednotka [34]	45
4.6	Zapojení jednotky s-BMS Monitoring unit	45
4.7	Koncept zapojení systému s-BMS	46
4.8	Schéma elektrického zapojení modulárního akumulčního systému	47

Úvod

Elektrická energie je neodmyslitelnou součástí života dnešní společnosti. Naše civilizace je plná elektrických zařízení a těžko si už dokážeme představit život bez nich. Elektrická energie je ovšem specifická v tom, že ji nelze skladovat ve své základní fyzikální podobě. Proto postupně vznikají různé akumulací systémy, které dokáží naakumulovanou elektrickou energii uchovat třeba ve formě kinetické energie - např. přečerpávací elektrárny, nebo v podobě chemické energie. Tyto formy energie jsou pak přeměněny na energii elektrickou. Potřeba uchovávat naakumulovanou energii vzrůstá s rozvojem obnovitelných zdrojů energie nebo třeba elektromobilitou. Pro tyto případy slouží akumulací systémy, které jsou předmětem této práce.

V této bakalářské práci bude prvním cílem rozbor teoretické oblasti modulárních akumulací systémů. Bude snaha uvést do problematiky akumulací systémů a všech částí těchto systémů tak, aby byly zřejmé jejich vlastnosti a principy jejich funkcí. Nejvíce se pak budeme v první části práce zaměřovat na akumulací systémy na bázi lithiových baterií, abychom položili teoretický základ pro konkrétní návrh modulárního akumulací systému, který budeme řešit ve druhé části této práce. Za cíl bude podrobněji rozebrat různé typy lithiových baterií a jejich vlastnosti. Dále pak popsat funkce (BMS) systémů a představit některé systémy nabízené na trhu.

Ve druhé části bakalářské práce pak bude cílem vytvořit návrh konkrétního akumulací systému. Vybereme nejvhodnější lithiový článek, BMS systém a taky vhodný rozvaděč pro parametry navrhovaného systému. Zakreslíme fyzické uspořádání a zapojení baterií do dílčích packů a sestavíme 3D model uspořádání packů do stojanového rozvaděče. Dále vybereme vhodný BMS systém, zakreslíme zapojení BMS systému a schéma elektrického obvodu celého navrhovaného prototypu. Poslední část bude věnována kalkulaci nákladů pro navržené řešení.

1 Základní pojmy

Na začátku této práce je důležité ujasnění základních pojmů, které se v práci budou vyskytovat a se kterými budeme dále pracovat.

1.1 Nezávislé zdroje energie

Nezávislý zdroj energie je zdroj, který ve chvíli, kdy z něj energii dodáváme, je jediným zdrojem energie. Ve své podstatě jen mění energii z jedné formy na druhou. V případě této práce se bude jednat o elektrochemické články. Půjde tedy o přeměnu energie chemické formy na energii formy elektrické.

Nezávislé zdroje energie můžeme rozdělit na dvě kategorie. První kategorií jsou **primární články**. Ty jsou nezávislé zdroje energie, které nejsou schopny zpětné chemické reakce. Potom, co v nich poklesne napětí pod určitou mez a články jsou vybity, není možné je opětovně nabít a znovu přivést do provozu schopného stavu. Takovéto vybité články se stávají odpadem.

Druhá z kategorií jsou **články sekundární**, jinak též akumulátory. Jsou to zdroje elektrické energie, které jsou schopny elektrickou energii nejen vydávat, ale také ukládat. Lze je tedy použít opakovaně [1].

V této práci budeme pracovat s akumulátory, konkrétněji s bateriemi na bázi lithia.

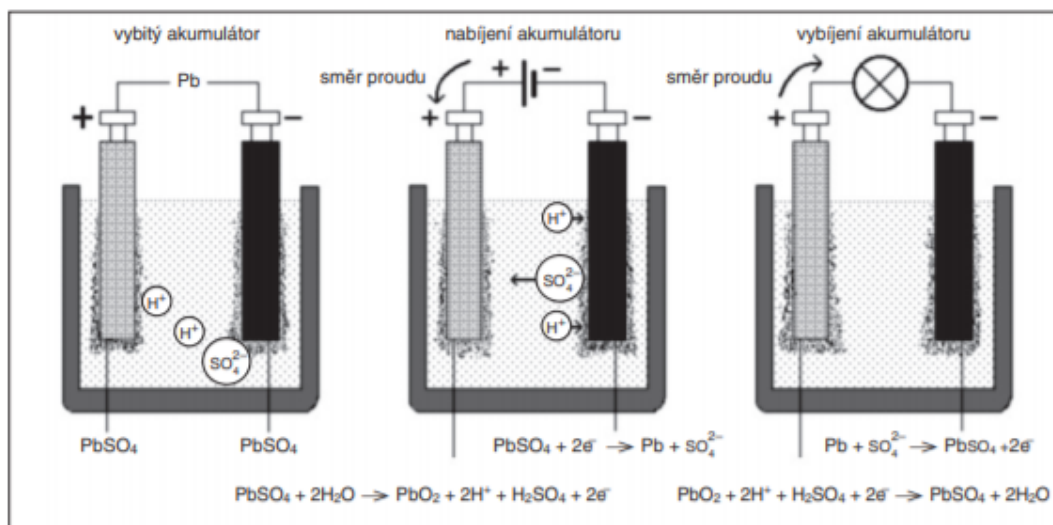
1.2 Akumulátor elektrické energie

1.2.1 Olověné akumulátory

Akumulátorové baterie jsou důležité zejména pro obnovitelné zdroje energie. Například uhelné elektrárny se na svůj plný výkon rozjedou během půl dne, jaderné až během několika týdnů. U slunečních a větrných elektráren je zase problém s nerovnoměrností větru a slunečního svitu. Proto je třeba v čase, kdy je energie více, ji umět uchovávat. Akumulátory se začaly vyvíjet už ve druhé polovině 19. století. V roce 1859 přišel francouzský fyzik G. R. Planté s prvním akumulátorem, který se skládal z párů olověných desek ponořených do nádoby s roztokem kyseliny sírové. Tyto baterie dosahovaly účinnosti až 80 %.

V případě olověného akumulátoru s olověnými elektrodami, se jako elektrolyt používá zředěná kyselina sírová. Ta v roztoku disociuje na kladné vodíkové a záporné síranové ionty. Na obou elektrodách dochází ke vzniku síranu olovnatého. Elektromotorické nabití jednoho tohoto nabitého článku je rovno přibližně 2 V. Pro

automobilové baterie je zapojeno sériově 6 článků, tedy výsledné napětí se rovná 12 V [3].



Obr. 1.1: Schéma olověného akumulátoru [3]

Z určitého pohledu se dá říci, že je jedno, který akumulátor na co použijeme, pokud má odpovídající napětí a kapacitu. Pokud se na to ale zaměříme podrobněji, zjistíme, že máme jiné požadavky pro akumulátor, který se použije třeba pro telekomunikační zařízení, a jiné pro ten, který je použit pro nastartování automobilu. Každá taková oblast potřebuje jiné vlastnosti. Právě akumulátor v motorových vozidlech pracuje tak, že po nastartování musí akumulátor být schopen zvládnout velké proudové požadavky, které se pohybují kolem několika stovek ampérů. A po nastartování, pokud je palubní dobíjecí soustava v pořádku, je už akumulátor jen dobíjen.

Olověný akumulátor má pro automobily spoustu vhodných vlastností. Mezi ně patří třeba velmi malý vnitřní odpor (přibližně $0,001 \Omega$). Díky tomu akumulátor dokáže dodat krátkodobě mnoho energie a současně dochází pouze k velmi malému poklesu svorkového napětí, což je velmi důležitá vlastnost právě u startování motoru. Další dobrou vlastností je nízká cena a již zvládnutá technologie výroby. Také má velkou energetickou účinnost (přibližně 85 %) a tedy vydá velký podíl dodaných Ah. Nevýhodou může být například jejich velká hmotnost nebo menší životnost [4].

1.2.2 Vývoj

Dalšími akumulátory byly nikl-kadmiové (NiCd) a nikl-železné (NiFe), které vynalezl švédský vynálezce W. Jungner. Druhý typ využíval ve velkém měřítku T. A. Edison. V nich se střídají železné a niklové destičky, které jsou ponořeny do elektrolytu na

bázi KOH. To, že neobsahují ani kadmium ani olovo, je užitečné zejména pro životní prostředí, protože se jedná o toxické kovy. Články NiCd jsou často využívány, navíc nepotřebují složitou řídicí elektroniku, jsou spolehlivé a mají dlouhou životnost. Jejich energetická hustota se pohybuje okolo 50 kWh/m³. Využívají se například k regulaci větrných a solárních zdrojů na ostrově Bonoire v nizozemských Antilách, kde pomáhají k překonání rychlých výpadků, než naskočí zálohy.

Kvůli obsahu kadmia jsou ale nyní NiCd akumulátory často nahrazovány články nikl-metalhydridovými (NiMH) nebo lithium-iontovými (Li-ion). Ty mívají až trojnásobnou hustotu energie. Lithiové baterie byly vyvinuty na Texaské univerzitě týmem studentů, který vedl John Goodenough. Jejich výroba začala mezi lety 1998 a 2000. I když jejich začátky byly problematické (obzvláště, když se vybití baterie dostalo pod 30 %, což dost degradovalo jejich životnost), během dvaceti let vývoje se vylepšily obrovským způsobem. Lithiových baterií je mnoho různých typů, které využívají odlišné chemické reakce spočívající v transportu lithiových iontů mezi elektrodami v průběhu nabíjení a vybíjení. Tyto baterie neobsahují kovové lithium, protože jsou do struktury dodávány z jiných materiálů. Oxidy kovů nebo fosfáty pak s lithiem vytváří katodu a grafit nebo sloučenina z oxidu lithného a titaničitého anodu. Elektrolytem je například lithiová sůl v organickém rozpouštědle. Jednotlivé články se sestavují do multičlánekové baterie, která dokáže dodat potřebné napětí [2], [16].

1.2.3 Princip

Akumulátorové baterie (nebo-li elektrochemické akumulátory) uschovávají energii jakožto chemickou energii. Mezi jejich výhody patří například to, že se dají použít kdekoliv, mohou se několikrát nabít a také stojí relativně málo. K nevýhodám se zase řadí samovolné vybíjení a hluboké vybíjení, při kterém na elektrodách dochází k nevratným změnám, které následně ovlivňují kapacitu akumulátoru.

Pokud je akumulátor vybitý, k jeho nabití dochází tak, že pomocí elektrického proudu se reakční produkty převedou zpět na původní reaktanty. V průběhu nabíjení nabíjecím proudem z odlišného zdroje se získávaná elektrická energie přeměňuje na chemickou a během vybíjení naopak. Při tom se dodává do elektrického obvodu, do něhož je daný akumulátor zapojen. Během vybíjení je záporná elektroda katodou a během nabíjení anodou. Reaktant tu v průběhu vybíjení oxiduje a volné elektrony se tak předávají záporné elektrodě. Kladná elektroda to má naopak. Během vybíjení je anodou a při nabíjení katodou. Reaktant je při vybíjení redukován a volné elektrony přijímá z kladné elektrody.

Jelikož se elektrické napětí elektrochemických článků pohybuje pouze v hodnotách 1,1 - 2 V (záleží na typu akumulátoru), používají se v praxi pro technické

účely akumulátory, které jsou sestavené sériově do baterií. Většina akumulátorů se dá opětovně nabít ve stovkách až tisících cyklů.

1.2.4 Využití

Firmy Sony a Asahi Kasei byly prvními firmami, které začaly Li-ion baterie vyrábět ve velkém. Jejich využití je obrovské. Od drobných zařízení pro drobnou elektroniku (například mobily), přes akumulátory pro solární panely na střechách, až po bateriová úložiště pro velkou elektroenergetiku. Tam fungují i v multimegawattových oblastech a jsou schopny tyto výkony dodávat po několik hodin. Účinnost takových baterií se pohybuje až nad 90 %. Mají ovšem také své nevýhody. Jedná se především o životnost a hrozbu destrukce či vzplanutí. Technologie, které zajišťují jejich bezpečný provoz, se ale stále zlepšují. Hustota energie se pohybuje kolem 300 kWh/m³. V laboratořích se snaží tuto hustotu zvednout až na 500 kWh/m³, což se týká hlavně baterií pro elektromobily.

Na konci roku 2017 firma Elona Muska nainstalovala v Austrálii velkou sestavu Li-ion baterií, která je připojena k síti ve větrné farmě francouzské společnosti Neoen. Výkon této sestavy je 100 MW a kapacita 129 MWh. Díky bateriovému úložišti se daří vyrovnávat výkyvy sítě v Jižní Austrálii. Takto velká sestava je neobvyklá. Normálně se vyskytují sestavy o výkonu přibližně 10 MW a kapacitě 10 MWh [2].

Další využití lithiových článků se projevuje zejména u mobilních telefonů, kamer, notebooků, vysílaček či ručních náradí. Vybíjecí napětí je rovno průměrně 3,2 V a k dispozici je energie o velikosti 6 - 13 Wh. Také se používají hojně v rámci elektrických vozidel [17].

1.2.5 Vlastnosti

V této části se zaměříme na výhody a nevýhody lithiových akumulátorů. Čerpat budeme z [11].

Výhody

- Vysoká energetická hustota (objemová i hmotnostní)
- Nízké samovybíjení
- Jednoduchý princip nabíjení
- Dobíjení je možné provádět v jakémkoliv stavu vybití bez negativního vlivu na stav článků
- Velké množství různých typů a provedení
- Vysoké jmenovité napětí (u Li-ion 3,6 - 3,7 V, u LiFe 3,2 V a u LTO 2,4 V)

Nevýhody

- Lithium a jeho sloučeniny na vzduchu reagují a degradují (při porušení článku riziko požáru)
- Po prvním nabití článek postupně ztrácí svou kapacitu (i když není používán)
- Výkon se snižující se teplotou klesá
- U větších baterií je potřeba přítomnosti balančních obvodů pro jednotlivé články

1.3 Konstrukce bateriových článků

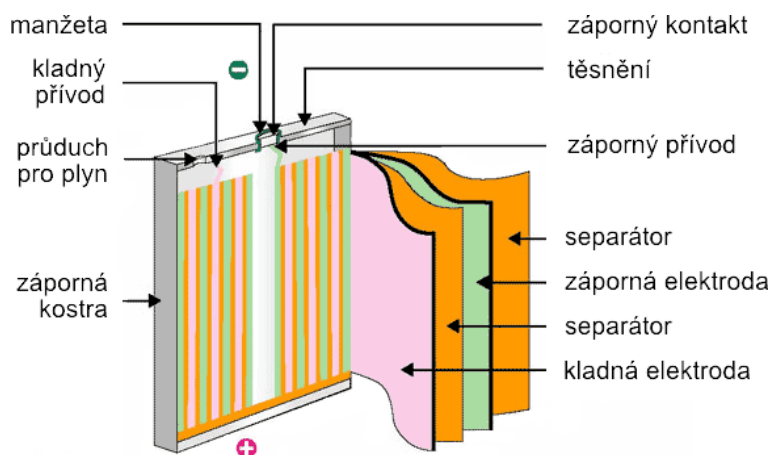
Elektrochemické články se skládají především z elektrod katody a anody. Dále pak z elektrolytu, separátoru a vnějšího obalu.

Katoda je pozitivní elektroda, která během vybíjení článku prochází oxidací.

Anoda je negativní elektroda, která během vybíjení článku prochází redukcí.

Elektrolyt je prostředí pro přenos iontů. Většinou se jedná o tekutinu, přes kterou se ionty během vybíjecího procesu přesouvají z jedné elektrody na druhou [5].

Separátor je propustný a nevodivý materiál oddělující od sebe elektrody. Slouží jako ochrana před možným zkratem. Procházejí přes něj nosiče náboje, proto musí být propustný, jinak by článek nemohl fungovat [1].

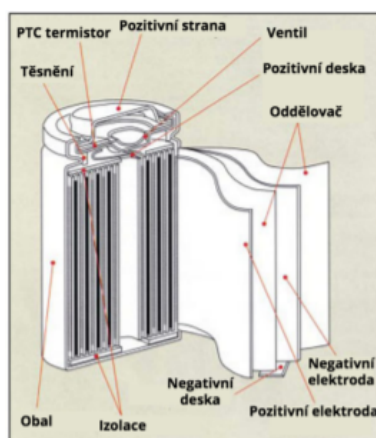


Obr. 1.2: Popis konstrukce elektrochemických článků [27]

1.3.1 Cylindrické články

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších technologií výroby akumulátorů pro elektrická vozidla. Nejvíce se na tom podílí Tesla, která spojuje za sebe tisíce Li-ion článků. Kvůli válcovému tvaru článku je celkový objem baterie větší, než by musel být. Mezi

články se totiž vytváří mezery, které nejsou využity. Současně se ale jedná i o výhodu, protože díky tomu dochází k aktivnímu nebo pasivnímu chlazení celé baterie.



Obr. 1.3: Schéma Li-ion cylindrického článku [6]

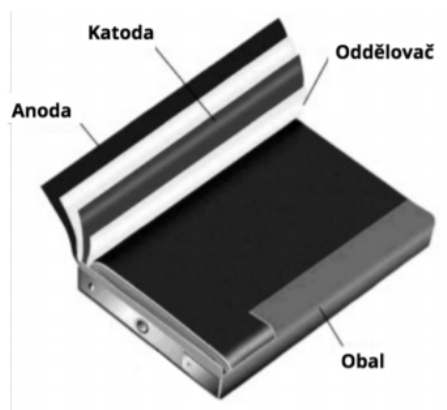
K nejpoužívanějším cylindrickým článkům patří 18650, 21700 a 26700, kde první dvoučíslí značí průměr článku v mm, a druhé výšku v mm.

Naprosto nejpoužívanějším typem je 18650, které využívá například Tesla ve svých modelech S a X nebo i český výrobce autobusů značky SOR. Velká část výrobců baterií pro automobilový průmysl (Tesla, Panasonic, Samsung) ale začíná používat víc typ 21700, který má lepší poměr kapacity a objemu ($6000 \text{ mAh}/97 \text{ cm}^3$). Když ho porovnáme s $3000 \text{ mAh}/66 \text{ cm}^3$, tak má o 35 % větší energetickou hustotu na jednotkový objem baterie.

Poslední zmíněný typ 26700 se moc nepoužívá, což způsobuje především jeho šířka, protože jeho výroba je technologicky dražší a náročnější. Má ale i svou výhodu, a sice, že je teplotně stabilnější a taky odolnější při vysokých zatíženích.

1.3.2 Prizmatické akumulátorové články

Tyto články se začaly vyrábět na konci minulého století. Technologie, pomocí níž se vyrábí, výborně splňuje veškeré požadavky pro aplikaci ve spotřební elektronice, což spočívá v tenkém profilu podlouhlého rozměru zasazeného do utěsněného hliníkového pouzdra. Pokud je seřadíme plošně a necháme zde i mezery pro chlazení, dají se tyto články využít i v různých modifikacích pro elektrická vozidla. Na těchto bateriích je zajímavé, že během zátěže a vlivem teploty mění svůj objem (až o 4 %). I proto je zde potřeba zmíněných mezer.



Obr. 1.4: Schéma prizmatického článku [6]

Budoucnost těchto článků se jeví slibně, protože na vylepšení technologie jejich výroby a vývoje chtějí spolupracovat firmy například Toyota a Panasonic. Vozy Toyota je chtějí aplikovat v průběhu několika příštích let.

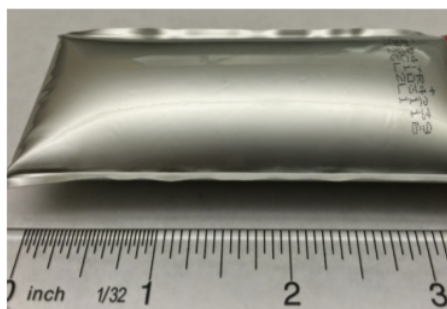
1.3.3 Vakové články

Co se týče využitého prostoru, patří tento typ článků k těm nejpraktičtějším. Nemá žádný standardní rozměr, výroba závisí na požadavcích zákazníka. Používané technologie jsou především Li-ion nebo Li-pol, případně jejich kombinace. Chování i vlastnosti nelze popsat obecně, protože se liší na základě velikosti a způsobu použití. Obecně však platí, že při jejich používání po přibližně 500 cyklech dochází k 8 - 10% změně objemu na základě nafukování. Pokud chceme docílit toho, aby články fungovaly bezchybně, je potřeba, aby na sebe jednotlivé články vyvíjely tlak a tím se zlepšily chemické procesy, které probíhají uvnitř nich.



Obr. 1.5: Vakový článek [6]

Tyto akumulátory se používají především tam, kde je potřeba nízké hmotnosti a vysokého proudu, například v dronech. Na následujícím obrázku lze pozorovat extrémně nafouknutý vadný článek [6].



Obr. 1.6: Nafouknutý vakový článek [6]

1.4 Parametry elektrochemických článků

1.4.1 Nominální napětí

Nominální neboli jmenovité napětí je stanoveno normou. Jeho velikost je rovna přibližně průměrnému napětí během vybíjení za normálních podmínek. U akumulátorových článků typu NiCd nebo NiMH je toto napětí rovno přibližně 1,2 V a u Li-ion článků přibližně 3,6 V [7].

1.4.2 Kapacita

Kapacita baterie je měřena v miliampérech x hodinách (mAh). Například jestliže má baterie kapacitu rovnou 250 mAh a dodává průměrně proud o velikosti 2 mA, dá se teoreticky říct, že tato baterie vydrží 125 hodin. Nicméně ve skutečnosti má každé vybití baterie dopad na její skutečnou životnost. Pokud baterii vybíjíme takovou rychlostí, jakou doporučil výrobce, obvykle nám to pomáhá udržovat baterii blízko své jmenovité kapacitě [8].

1.4.3 Životnost

Cyklická životnost se určuje počtem tzv. plných cyklů, které výrobce garantuje. Váže se to k poklesu kapacity baterie pod 80 % z původní hodnoty při C20 (tzn., že pomocí proudu 0,2 C článek vybíjíme po dobu 20 hodin do konečného vybití). Běžné hodnoty se pohybují od jednotek stovek cyklů (olověné startovací baterie), přes jednotky tisíc cyklů (běžné technologie založené na Li), až po desítky tisíc cyklů

(články Li-Ti).

Kalendářní životnost je doba, během které je baterie schopna plnit předepsané parametry, nejvýše s jejich dovolenou změnou. Obvykle se udává v letech. Často se stává, že je tato hodnota ovlivňována konkurencí a výrobci ji tak zvyšují. Už při hodnotě větší než 3 roky je těžké tento údaj ověřit a životnost 10 let a výš je možné dosáhnout pouze za předpokladu, že budou dodrženy přísné podmínky uskladňování a provoz bateriového systému. Například ale u větších bateriových systémů se ukazuje, že pokud baterie selže, skrývá se za tím selhání jednotlivých článků. Při jejich výměně dochází pak k prodloužení životnosti celého systému.

Kombinovaná životnost je kombinace cyklické a kalendářní životnosti. Obvykle se udává jako "X cyklů nebo Y let", kde záleží na tom, co nastane dřív. Jedná se o komplexní popis životnosti bateriového systému z hlediska jeho stárnutí. Samozřejmě se to netýká časných nebo náhodných poruch, které se vyskytují v každém systému.

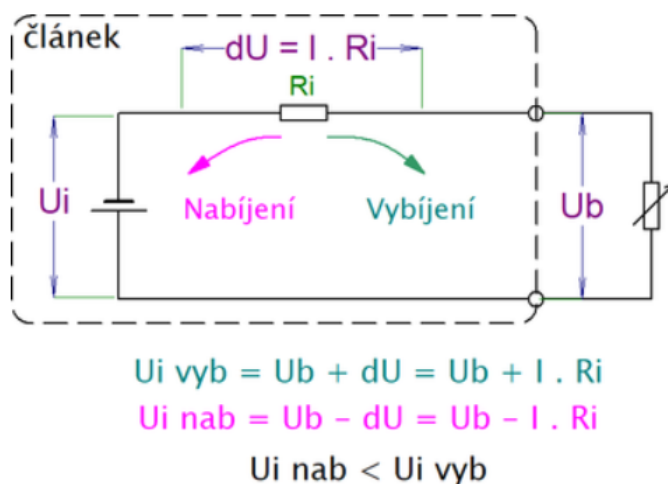
Životnost baterie závisí na:

Teplotě, při které se baterie používá a skladuje. Obecně se dá říct, že čím vyšší teplota, tím lépe baterie fungují, protože pomáhá průběhu chemických reakcí a tedy i lepšímu využití kapacity baterie. Současně ale dochází i ke zrychlení samovybíjení a zhoršení elektrochemického systému. Nemůžeme tedy pracovní teplotu zvyšovat nějak moc. Teploty v rozmezí 15 - 35 °C se dají považovat za teploty, při nichž bateriové systémy pracují spolehlivě. Při překročení vrchní hranice musí docházet (především u lithiových baterií) k chlazení. Díky chlazení ale dochází ke snižování účinnosti. Jako řešení by mohl být přechod k vysokoteplotním bateriím (např. sodík-síra), které jsou schopny pracovat při teplotě 300 °C, což bývá využíváno především v pouštních oblastech.

Skladovací teplota zase ovlivňuje rychlost samovybíjení baterie. Pokud se teplota při skladování zvýší o 10 °C, rychlost samovybíjení se zvýší přibližně dvojnásobně. Pokud bychom díky samovybíjení došli až k hlubokému vybití baterie, výrazně se sníží životnost baterie, pokud se i zcela nezničí.

Způsobu (rychlosti) vybíjení (to samé i při nabíjení). Jak lze vidět na obrázku 1.7, systém článku můžeme modelovat i jako sériové spojení vnitřního ideálního zdroje napětí U_i a vnitřního odporu R_i . Tento odpor má v případě procházejícího vybíjecího proudu za následek úbytek napětí dU a tím i pokles napětí svorkového. U nabíjení se situace obrací a svorkové napětí má vyšší hodnotu než vnitřní. Tedy svorkové napětí nekopíruje to vnitřní a chyba určení vnitřního napětí je tím větší,

čím větší je procházející proud. Jelikož je vnitřní odpor funkcí SOC (stavu nabití), teploty i procházejícího proudu, výpočet skutečného napětí je obtížný. Tedy vnější obvod nezná přesnou hodnotu vnitřního napětí U_i a může dojít k dřívějšímu vypnutí ochranných obvodů i při nabíjení (U_{inab}), i při vybíjení (U_{ivyb}). Dalším z negativ velkých proudů je ohřátí baterie.



Obr. 1.7: Náhradní schéma elektrochemického článku [9]

Hloubce vybití a době, po kterou setrvá v daném stavu nabití nebo přebíjení. Zejména u lithiových bateriových systémů se dají tyto stavy označit za havarijní. Pokud má ale systém dobře navržený BMS, měl by být schopen těmto stavům předcházet, případně je eliminovat a baterii tak ochránit.

Použitých materiálů a kvalitě, s jakou byl daný článek zpracován. Je důležité zajistit co nejmenší možné odchylky v parametrech jednotlivých článků a udržet toto nejen při sestavování baterie, ale i po celou předpokládanou životnost systému. Například u lithiových technologií se jedná zejména o čistotu vstupních surovin a vlhkost vzduchu (je zapotřebí co nejsušší vzduch). U dalších typů článků jsou tyto požadavky mnohem méně náročnější. I z toho důvodu je výroba lithiových článků nákladnější [9].

1.4.4 Vybíjecí-nabíjecí proud

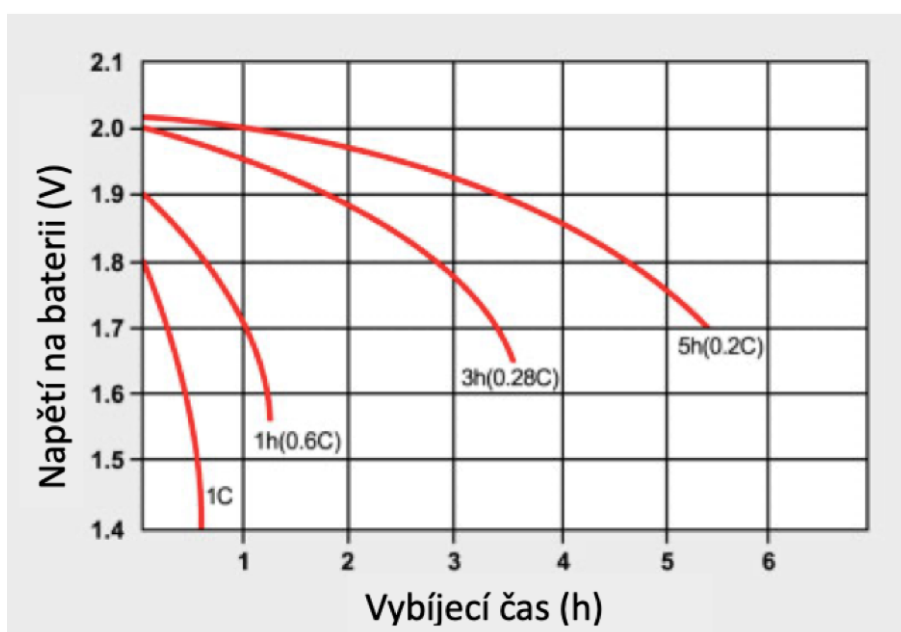
V této podkapitole budeme opět čerpat z [1]. Různé baterie jsou uzpůsobeny pro různé vybíjecí i nabíjecí proudy. K vyjádření vybíjecího a nabíjecího proudu se používá zkušební referenční proud I_t , který se definuje touto rovnicí:

$$I_t[A] = C[Ah/1h] \quad (1.1)$$

Dnes se ale častěji setkáme přímo s parametrem C-rate. Tento parametr vypovídá o velikosti proudu tak, že proud 1 C se rovná vybíjení baterie takovým proudem, aby jej dokázala baterie dodávat po jednu hodinu. Neboli plně nabitá baterie s kapacitou 1 Ah vybíjená proudem $1\text{ A} = 1\text{ C}$ po dobu jedné hodiny. Má-li proud hodnotu 2 C, dokáže tato baterie dodávat tento dvakrát větší proud dvakrát menší dobu, tedy 30 min.

Pokud se nabíjí baterie na 100 % kapacity, při dobití proudem 1 C i 2 C bychom měli dodat stejné množství energie. Čím větším proudem ale baterii nabíjíme, tím větší jsou vnitřní ztráty a část energie je přeměněna na energii tepelnou. Výrobci většinou vyrábí baterie s rezervou, takže při pomalém dobíjení, třeba 0,5 C a teda i dvakrát delším čase nabíjení, jsme schopni se dostat na kapacitu větší než 100 % její uvedené hodnoty. Naopak, pokud nabíjíme proudem 2 C, tak se za patřičný čas, který by měl teoreticky stačit k úplnému dobití baterie, nabije baterie pouze na přibližně 95 %, i méně.

Na obrázku 1.8 jsou zobrazeny typické vybíjecí křivky u olověných akumulátorů, které zobrazují pokles napětí článku v čase při vybíjení různými proudy C.



Obr. 1.8: Vybíjecí křivky funkce C v čase [10]

Akumulátory na bázi olova a niklu lze vybíjet vysokou rychlostí. U lithiových baterií dost záleží na typu baterie a rozsah bývá velký od 0,7 C až po 25 C. U krátkých pulsů dokáží některé typy dodat i mnohem větší proudy. Nabíjení baterií bývá proudy menšími, nejčastěji 0,7 - 2 C. Opět zde hodně záleží na typu baterie [10].

1.4.5 Počet cyklů

Cyklus není nijak celkově definován, obvykle se ale předpokládá, že se jedná o jedno vybití a nabití baterie. K řádné definici potřebujeme ještě zavést pojmy hloubka vybití a stav života.

Hloubka vybití

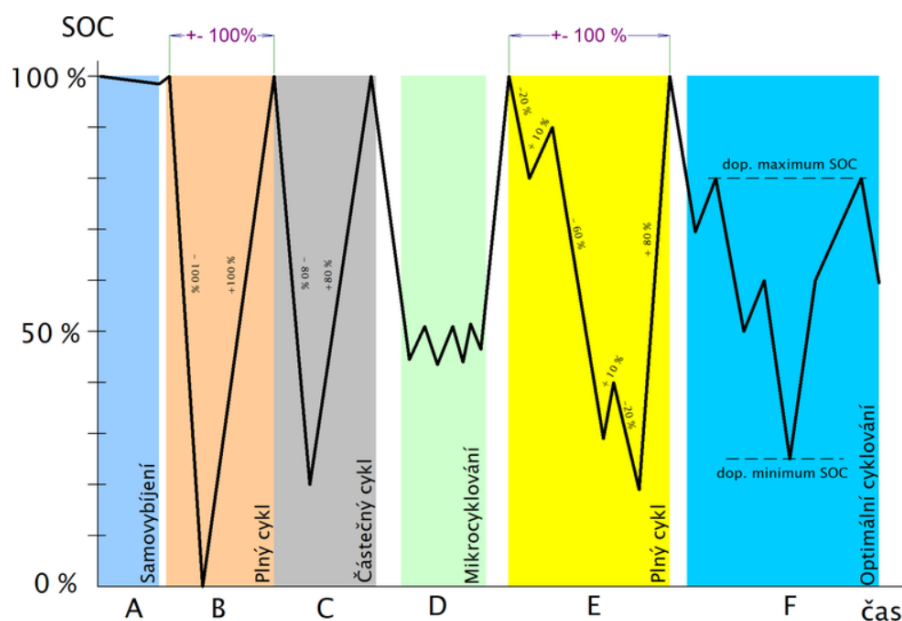
Hloubka vybití je veličina, která nám říká, jaký je současný podíl energie nacházející se v baterii k celkové kapacitě baterie. Současně platí, že $SOC = 100 - DOD$ (%), kde SOC značí *stav nabití* (State of charge) a DOD *hloubku vybití* (Deep of discharge). Celkové množství energie v baterii je definováno obtížně, ale obecně se pod tímto pojmem skrývá nominální dostupná kapacita baterie. Jinak řečeno stav, kdy je 100 % SOC, tedy údaj z katalogu. Problém ale nastává, když baterie stárne, tedy se snižuje reálná kapacita a určování SOC je chybné.

Důležité je zmínit to, že lithiové technologie jsou, coby do vlivu hloubky vybití na životnost článku, odolnější, než olovené. Olovené články mají svou hranici velkého snížení životnosti už při 50 % SOC, ty lithiové až při 15 % SOC (což je 85 % DOD). Můžeme tedy využívat 85 % kapacity baterie.

Stav života Nebo-li State of health (SOH) se udává jako číslo, které vyjadřuje poměr aktuální kapacity článku a kapacity, která se píše v katalogu. Pro nové články platí, že by se mělo rovnat 1, resp. 100 %.

Baterie se během doby, kdy je v provozu, může nacházet celkem ve 3 stavech - nabíjení, vybíjení a samovybíjení. Obecná definice cyklu se dá popsat jako změna směru toku energie. Tedy baterie se vybíjí (dodává energii), následně nabíjí (dodáváme energii) a poté opět započne vybíjení. Pokud baterii nabíjíme až v případě, kdy dosáhne minimálního povoleného SOC, tedy maximální povolenou hloubku vybití, a nabíjíme ji zpátky do 100 % SOC, cykly se počítají jednoduše, viz na obrázku 1.9 oblast B, C. Ne pokaždé ale dochází k tomu, že se baterie začne nabíjet až po jejím vyčerpání. Proto jsou zavedeny i pojmy "mikrocyclování" (oblast D) či "optimální cyclování" (oblast F). V takových případech není lehké určit počet cyklů. I z toho důvodu je pojem "plný cykl" nejlepší možnou variantou.

Pro výpočet cyklů je potřebný algoritmus, na kterém se vlastně stále pracuje. Jak asi i vyplývá z předchozího odstavce, určení počtu cyklů opravdu není jednoduché. Tento výpočet je úzce spjat s určováním SOC a SOH. Algoritmus používá jako vstupní data okamžité údaje o proudu a napětí. V rámci interní paměti vyhodnocovacího obvodu jsou tyto údaje zpracovány a identifikovány v části, kdy se baterie



Obr. 1.9: Popis různých typů cyklů [9]

nabíjí, vybíjí, případně kdy probíhá stav bez zátěže. Cyklus se pak identifikuje pomocí softwaru (např. Fuzzy logika, genetické algoritmy či analýza časové řady). Stále ale tyto výpočty nejsou stoprocentní, a proto v současnosti probíhá intenzivní výzkum pro zlepšení vyhodnocování cyklů a hlavně i pro zpřesnění informací pro reklamace [9].

1.5 Základní charakteristiky

V této podkapitole je čerpáno ze zdrojů [21] a [1].

1.5.1 Nabíjecí charakteristika

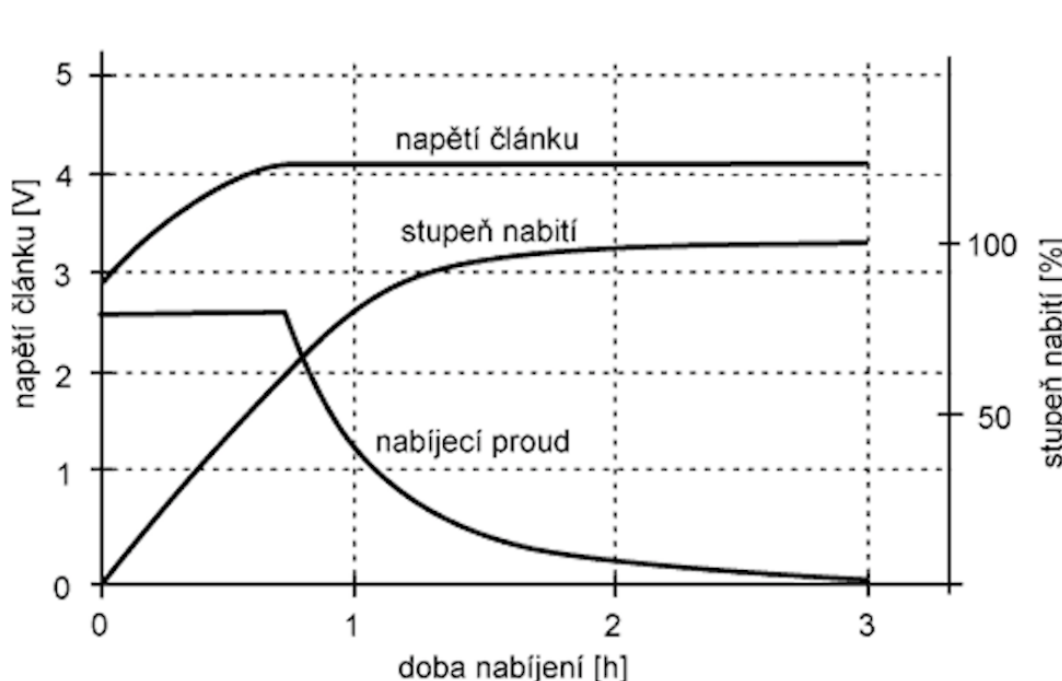
Nabíjecí charakteristiky nám říkají, jak vypadají průběhy proudu [A], kterým je baterie napájena a napětí [V] na ní v čase [t] nabíjení, jak je zobrazeno na obrázku 1.10. Často se do grafu vyznačuje i úroveň nabití akumulátoru, což je procentuální vyjádření toho, jaká část z kapacity akumulátoru je momentálně využita. Nabíjecí proud je určen výrobcem.

Nabíjení

K nabíjení lithiových akumulátorů se používá zejména metoda CCCV (Constant Current followed by Constant Voltage), tedy konstantní proud a poté konstantní napětí, jak je taky vidět na obrázku 1.10, a je to průběh s proudem 1 C. Na tomto

obrázku vidíme, že nabíjení je rychlé. V první části nabíjení CC (konstantní proud) nabíjíme proudem do doby, než dosáhneme konečného napětí na článku. Článek v této chvíli bývá většinou nabit přibližně ze 70 %, přičemž nemusíme nijak zvlášť dbát na to, aby byl nabíjecí proud konstantní. Jen nesmíme překročit jeho maximální hodnotu, kterou udává výrobce. Jeho velikost pak tedy jen ovlivňuje rychlost nabíjení. S napětím už ale musíme zacházet velice opatrně, protože překročením jeho maximální hranice se článek poškozuje a můžeme si tedy dovolit odchylku jen asi 1 %.

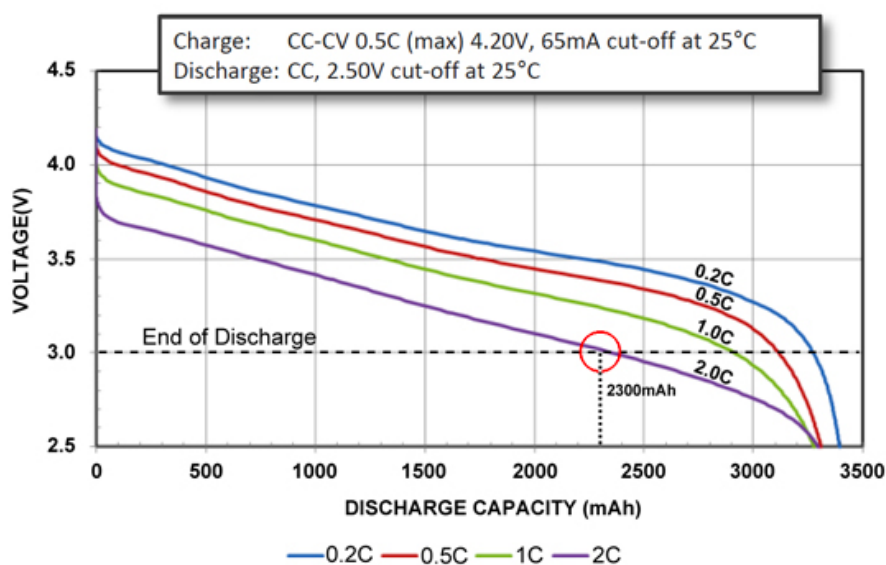
Ve druhé části CV (konstantního napětí), potom co se napětí ustálí na jeho požadované hodnotě, velikost nabíjecího proudu klesá. Článek se za nabitý považuje při poklesu nabíjecího proudu pod hodnotu asi 0,05 C. Pro nabíjení lithiových baterií se používají buď speciální nabíječky, nebo u zařízení, které obsahují akumulátory s BMS, hlídají potřebné parametry přímo tyto BMS obvody.



Obr. 1.10: Průběh napětí, proudu a úrovně nabití při nabíjení akumulátoru Li-ion [21]

1.5.2 Vybíjecí charakteristika

Vybíjecí charakteristiky nám říkají, jak vypadají průběhy závislosti napětí [V] akumulátoru na čase [t], nebo napětí na kapacitě [%] akumulátoru. Často v grafech bývají průběhy při několika velikostech zátěžného proudu, jak je zobrazeno na obrázku 1.11.



Obr. 1.11: Vybíjecí charakteristiky napětí a kapacity v závislosti na vybíjecím proudu pro Li-ionový akumulátor [22]

Vybíjení

Dováňaný výkon, či vybíjecí proud **lithiových** akumulátorů, může být různý.

Baterie lze rozdělit na dvě skupiny - baterie s dlouhou výdrží, které dodávají malý výkon, a výkonové baterie, které dokáží dodávat trvale velké výkony. Vyššího výkonu je dosaženo částečně snížením vnitřního odporu a optimalizací povrchu aktivních materiálů článku. Zatímco články s dlouhou výdrží jsou uzpůsobeny dodávat proudy okolo 1 C, výkonové články mohou dlouhodobě dodávat i 30 C. Každá z baterií má taky patřičné ochranné prvky, zejména BMS, které hlídá povolená maxima odebíraných proudů a také velice důležité napětí, které nesmí klesnout pod určitou mez závisující na typu článku uvedenou výrobcem. Při překročení těchto hodnot se baterie může nevratně poškodit, či být dokonce nebezpečná [22], [23].

2 Lithiové články

Lithiové akumulátory mají většinu svých parametrů lepší než olověné, Ni-Cd i Ni-MH akumulátory. Používají se od devadesátých let a jejich hlavní výhodou je vyšší energetická hustota hmotnostní i energetická hustota objemová, protože lithium je nejjednodušší z používaných kovů a má největší elektrochemický potenciál 3,04 V [11].

Další z výhod jsou jednoduchost dobíjení a možnost dobíjet v jakékoliv chvíli, aniž by to na baterii mělo negativní účinky a nemají tak citelné samovybíjení. To je více než o polovinu nižší (narozdíl od systémů na bázi niklu).

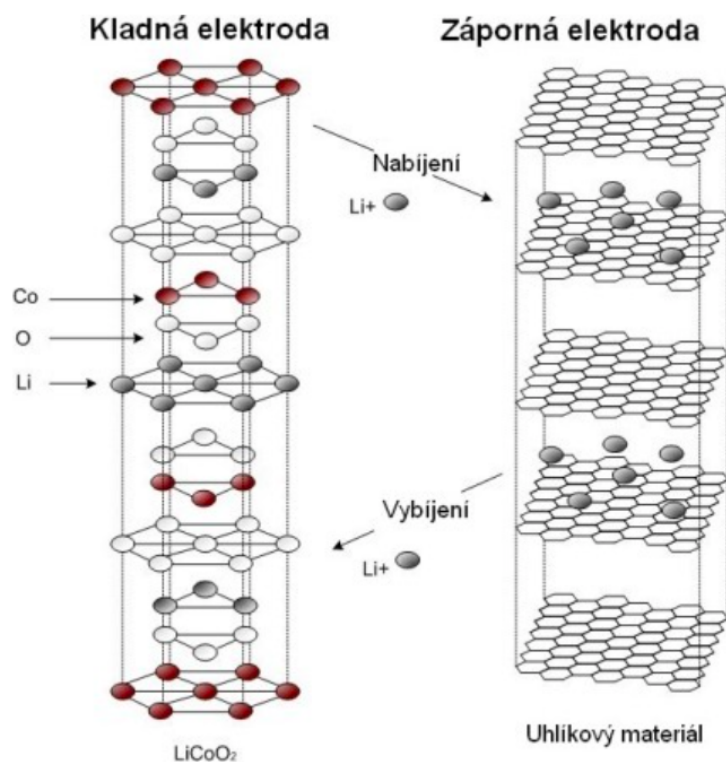
Jedna z nevýhod lithiových baterií je nestabilita samotného lithia jakožto kovu. Ta vývoj lithiových baterií zprvu brzdila. Nyní se již využívají oxidy sloučenin lithia a dalších prvků, což nestabilitu částečně potlačuje. I tak ale mohou být mnohé typy lithiových akumulátorů nebezpečné a vyžadují tak charakteristický způsob zacházení a bezpečnostní opatření, například použití systému pro správu Li-ion baterie (dále jen BMS) [12].

2.1 Princip lithiových článků

To, co odlišuje lithiové akumulátory od ostatních druhů akumulátorů je skutečnost, že ionty lithia chemicky nereagují s jinými materiály, ale pouze interkalují, čili se vmísí do mřížky jiného materiálu. Zrovna tato okolnost má pak za následek delší životnost akumulátorů s malou změnou výkonu. Oproti jiným akumulátorům mají taky vyšší jmenovité napětí, které je v rozsahu hodnot od 2,4 V až po 3,7 V na jeden článek podle použité technologie. Takto vysoké napětí, jak už bylo zmíněno, zaručuje bezkonkurenčně vyšší energickou hustotu.

Akumulátory na bázi lithia využívají jako katodu oxidy sloučenin lithia a dalších prvků, například lithium-kobalt oxid ($LiCoO_2$), lithium-mangan oxid ($Li_xMn_2O_4$), lithium-nikl dioxid ($LiNiO_2$), lithium-vanad oxid (LiV_2O_5) a další, potažené na hliníkovém sběrači proudu. Každý z těchto druhů katod určuje vlastnosti daných článků.

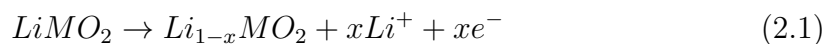
U baterií na bázi lithia bývá využíván bezvodý elektrolyt, jímž bývá nejčastěji lithium hexafluorofosfát ($LiPF_6$) v nepolárním organickém rozpouštědle. Záporná elektroda, anoda, ve většině případů bývá tvořena porézním uhlíkem - grafitem, potaženým na měděném sběrači proudu, u lithium titanátových ale například titanátem (Li_2TiO_3). Do budoucna si výzkumníci slibují zlepšení výkonu akumulátoru použitím grafenu namísto grafitu.



Obr. 2.1: Princip funkce lithiového akumulátoru [28]

Během nabíjení článku se na kladné elektrodě uvolňují kladné ionty lithia a jsou přitahovány k záporné elektrodě, kde jsou včleňovány do její struktury. Současně jsou také odebírány elektrony, které jsou pomocí nabíjecího zdroje přesouvány do záporné elektrody, kde probíhá reakce s ionty lithia. Vybíjení probíhá opačným způsobem. Oba děje lze popsat následujícími rovnicemi:

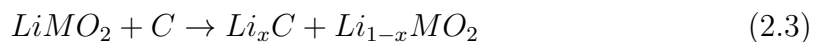
Kladná elektroda:



Záporná elektroda:



Souhrn:



Tyto rovnice představují proces nabíjení. Pro vybíjení by se strany prohodily. Písmeno M v těchto rovnicích představuje kov použitý v aktivní vrstvě katody. Nejčastěji se jedná o kobalt, nikl, mangan a železo [15].

2.2 Druhy lithiových článků

V této kapitole bylo čerpáno z [13].

Li-ion baterie se dodávají v mnoha variantách. I když jsou tyto baterie na první pohled nápadně podobné, liší se nejen výkonem, a výběr aktivních materiálů jim dává specifické vlastnosti.

Nejznámější typy lithiových článků:

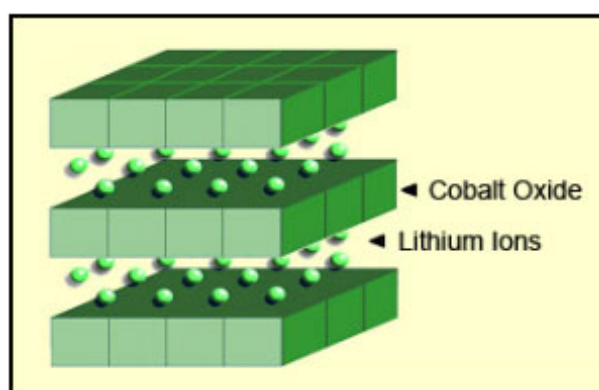
- Články LCO ($LiCoO_2$)
- Články LMO ($LiMn_2O_4$)
- Články LTO (Li_2TiO_3)
- Články LFP ($LiFePO_4$)

Abychom vybrali typ baterie, který se nejvíc hodí pro naše použití, je třeba znát klady a zápory jednotlivých typů akumulátorů a vybrat pak ten, jenž se nejvíc hodí pro naši aplikaci.

2.2.1 Články LCO ($LiCoO_2$)

Protože má LCO článek vysokou specifickou energii, býval od roku 1991 oblíbený pro užití v mobilních telefonech, digitálních fotoaparátech či noteboocích. Článek se skládá z katody oxidu kobaltu a anody, kterou tvoří klasicky grafit. Počet cyklů a kapacita baterie je negativně ovlivněna rychlým nabíjením a nebo nabíjením při nízkých teplotách.

Z vrstvené struktury katody se během vybíjení ionty lithia přesunují z anody na katodu. Při nabíjení je tok iontů obrácený. Struktura katody LCO článku je zobrazena na obrázku 2.2. Nevýhodou Li-kobaltového článku je poměrně krátká životnost, omezené možnosti zatížení a nízká tepelná stabilita.



Obr. 2.2: Struktura katody LCO článku [13]

LCO článek by neměl být vybíjen proudem vyšším, než je jedno C. Tedy článek s kapacitou 2400 mAh lze nabíjet či vybíjet pouze proudem 2400 mA. Při překračování

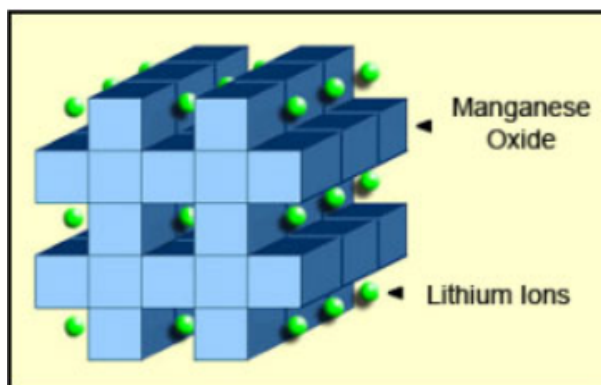
této mezní hodnoty proudu dochází k přehřívání baterie. Optimální rychlost nabíjení je dle výrobců většinou 0,8 C nebo přibližně 2 A. Baterie tedy musí mít ochranný obvod, který nedovolí překročení bezpečné hranice proudu 1 C či teploty článku.

Bateriím LCO ale konkurují ostatní typy lithiových baterií, zejména pro vysokou cenu kobaltu a lepším výkonům baterií s jinými aktivními katodovými materiály.

2.2.2 Články LMO ($LiMn_2O_4$)

$LiMn_2O_4$ je spolu s Li-ion článkem brán jako katodový materiál. Jeho stavba vypadá jako trojrozměrná spinelová struktura, která zjednodušuje tok ionů na elektrodě, což vede například ke snížení vnitřního odporu. Další výhodou spinelu je vysoká tepelná stabilita a zlepšená bezpečnost. K nevýhodám patří třeba omezení cyklů či kalendářní životnosti.

Nízký vnitřní odpor článku umožňuje rychlé nabíjení a silnoprůdové vybíjení. Na obrázku 2.3 se nachází trojrozměrný krystalický rámec na katodě LMO baterie.



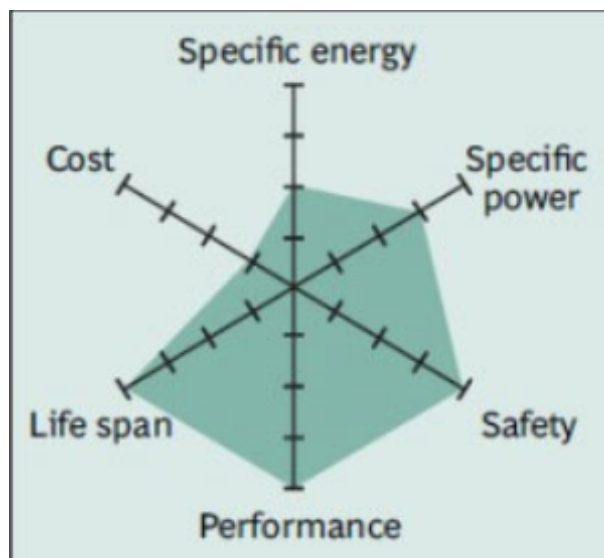
Obr. 2.3: Struktura katody LMO článku [13]

Baterie, které využívají tohoto materiálu, se kvůli vybíjení vyšším proudem mohou rychle zahřívat. Články LMO jsou používány u elektrických nářadí, lékařských nástrojů, nebo u hybridních či elektrických vozidel. Kapacita těchto článků je oproti LCO článkům zhruba o třetinu nižší.

2.2.3 Články LTO (Li_2TiO_3)

Lithium-titanové anody nahrazují v typických li-ion bateriích grafitové a materiál se tvoří do spinelové struktury. LTO má nominální napětí článku 2,4 V, může být rychle nabíjen a dodává vysoký vybíjecí proud 10 C nebo deseti násobek jmenovité kapacity. Počet cyklů je zde vyšší, než u běžných Li-ion typů. Jedná se o bezpečnou baterii, má výborné nízkoteplotní vybíjecí charakteristiky a i při -30 °C má kapacitu okolo 80 %. Sice je drahá, ale má termální stabilitu při vysokých teplotách. Články

nabíjí do 2,8 V a konec vybíjení je stanoven na 1,8 V. Na obrázku 2.4 jsou ukázány charakteristiky LTO baterie. Typické využití těchto baterií najdeme například u elektrických pohonných jednotek nebo venkovních osvětlení, které jsou poháněny skrz solární energii.



Obr. 2.4: Charakteristiky LTO baterie [13]

2.2.4 Články LFP ($LiFePO_4$)

Posledním typem lithiového článku je důležitý $LiFePO_4$, kterému se budeme věnovat nejvíce. Lithium-fosfát dodává dobrý elektrochemický výkon s nízkým odporem, což je možné u fosfátového katodového materiálu v nano měřítku. Mezi výhody se řadí vysoký proudový výkon a dlouhá životnost, dobrá termální stabilita a zvýšená bezpečnost.

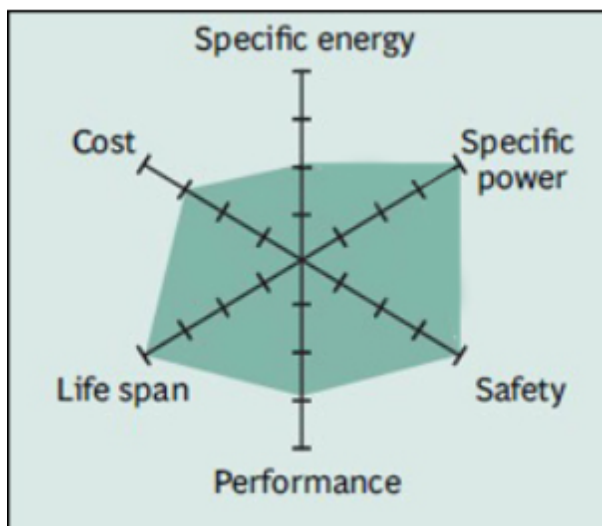
Li -fosfát je tolerantnější k podmínkám plného nabití a klidnější v případě, že je po delší čas udržováno vysoké napětí. Stejně jako většině bateriím i lithium-fosfátovým se při nižších teplotách snižuje výkon a při vyšších skladovacích teplotách se zkracuje životnost. Oproti jiným Li -ion bateriím má vyšší sebevybíjení, což se může projevit rychlejším stárnutím. To může být zmírněno nákupem článků vysoké kvality a/nebo použitím sofistikovaných elektronických kontrol, přičemž obě varianty zvyšují cenu baterie.

Li -fosfát je často používán jako náhražka olověných startovacích akumulátorů. Čtyři články zapojené do série vytváří 12,8 V, tedy podobné napětí jako šest 2 V olověných článků (zapojených opět v sérii).

Obrázek 2.5 shrnuje základní charakteristiky $LiFePO_4$ článků. Nominální napětí je 3,2 V, typický provozní rozsah co se týče napětí je 2,5 - 3,65 V/článek. Hmotnostní

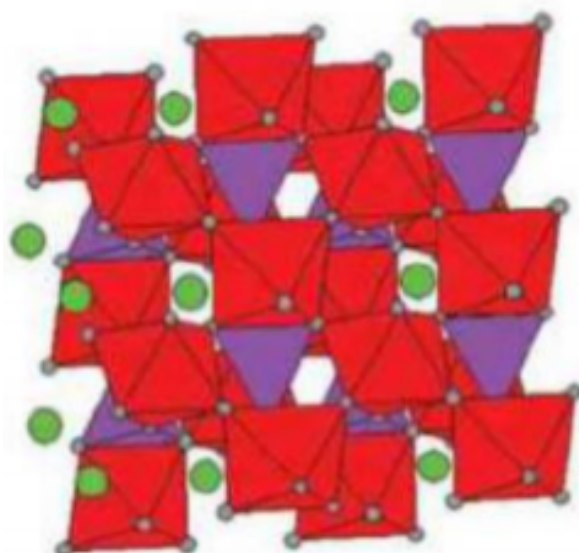
energetická hustota článku se pohybuje v rozmezí 90 - 120 Wh/kg. Životnost závisí na hloubce vybíjení a teplotě, ale udává se kolem 2000 cyklů a výš. Převážně se používají pro uchování energie.

Tyto články mají také vysoce stabilní chemické složení, jsou bezpečné a nehořlavé. Oproti Li-ion bateriím u nich neplatí, že by mohlo dojít k explozi či vzplanutí v případě, že dojde k přebití nebo zkratu. Mají také vysokou teplotní stabilitu (až do 500 °C).



Obr. 2.5: Charakteristiky LFP baterie [13]

Na obrázku 2.6 je znázorněna struktura $LiFePO_4$.



Obr. 2.6: Struktura $LiFePO_4$ [20]

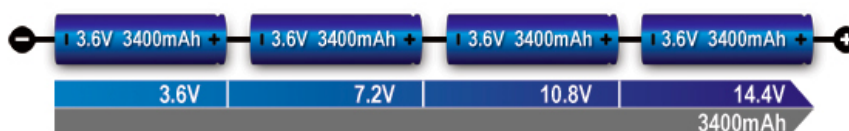
2.3 Skládání lithiových článků

Protože jednotlivé lithiové články mají napětí omezené elektrochemickým potenciálem elektrod a kapacity jednotlivých článků jsou pro některé aplikace nedostatečné, je pro jejich lepší využití nutné spojovat články paralelně, sériově a sérioparalelně, aby tak parametry celkového bateriového systému byly lepší. V této kapitole je čerpáno ze zdrojů [24], [25] a [26].

2.3.1 Zapojení článků do série

Abychom dosáhli přibližné výše napětí, která se běžně používá, je třeba spojit patřičný počet jednotlivých baterií do série. Nejčastěji využívaná napětí jsou 12 V, 18 V a 24 V například pro použití v elektrických nářadích, 36 V pro baterie použité v elektrických kolech a 48 V v domovních bateriových systémech. Jak je vidět na obrázku 2.7, napětí jednotlivých článků se v tomto zapojení sčítá. S čím větším napětím daný obvod pracuje, tím menší je při stejném výkonu proudové zatížení, což je výhodné zejména pro větší bezpečnost a možnost použít kabely s menšími průřezy.

U sériového zapojení lithiových článků nám ale vyvstane problém nerovnoměrného nabíjení a vybíjení článků, protože každý z článků může mít o trochu odlišné parametry, ať už od výroby, či různým stářím článků. Takovéto obvody pak musí být vybaveny balancérem, který zajišťuje, že se napětí na článcích rovnoměrně rozloží. Balancování a balancery jsou podrobněji popsány ve 3. kapitole.



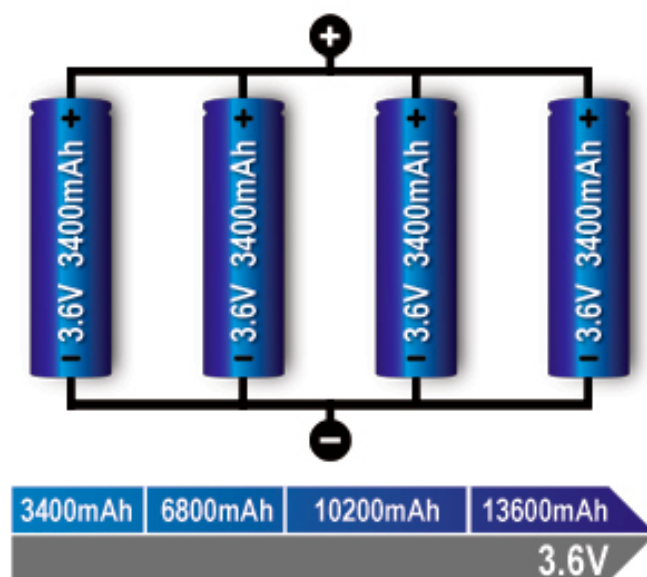
Obr. 2.7: Zapojení článků do série [29]

2.3.2 Zapojení článků paralelně

Potřebujeme-li dosáhnout větší kapacity systému, zapojujeme bateriové články paralelně. Při tomto zapojení, jak je vidět na obrázku 2.8, zůstává napětí bateriového packu stejné, zato se navyšuje jeho kapacita a maximální možné proudové zatížení.

U paralelního zapojení musíme řešit další problém. Články, jak bylo řečeno, nejsou naprosto totožné a každý z nich má trochu jiný vnitřní odpor. Proto je pak každý z nich zatížen jiným proudem, což zapříčiní vzájemnou nerovnoměrnost vybití

článků. Když systém odpojíme od zátěže, budou více nabitě články předávat energii článkům, které se vybily více a tím vznikají ztráty. Vyrobené články se někdy při jejich kontrolním měření výrobcem rozdělují podle vnitřního odporu a je tedy dobré používat v jednom bateriovém packu články s co nejtotožnější hodnotou vnitřního odporu.



Obr. 2.8: Paralelní zapojení článků [29]

2.4 Bateriové sestavy dostupné na trhu

Některé firmy na trhu prodávají hotové bateriové LiFePo packy, které lze samostatně používat, či někdy i sestavovat z jednotlivých bloků do větších bateriových systémů. Na trhu jsou k dostání bloky s velkou škálou napěťových hladin či kapacit. Tyto systémy zahrnují i BMS, komunikační rozhraní, a taky často rozvaděče, do kterých lze skládat jednotlivé bloky. Na trhu se pohybují například firmy BYD, Fronius, Huawei, LG Chem nebo Pylontech a další.

Firma **BYD** má největší nabídku na trhu. Nabízí Battery-boxy různých parametrů. Jako například bateriový pack BYD Battery-Box Premium HVS 12.8, který je ukázán na obrázku 2.9. Bateriový pack má, jak je vidět, pět bateriových modulů zapojených do série. Může jich mít až osm, navíc v jednom systému mohou být spojeny tři takové bateriové packy [30].

Základní parametry:

- rozsah napětí: 512 V

- proudová zatížitelnost: 25 A
- kapacita: 12,8 kWh



Obr. 2.9: Bateriový pack BYD Battery-Box Premium HVS 12.8 [30]

Firma **LG Chem** je další z firem, které se zabývají bateriovými LiFePo packy [31]. Tato firma prodává třeba bateriový pack RESU 10H - 400V lithium-ion storage battery. Je znázorněn na obrázku 2.10.

Základní parametry:

- rozsah napětí: 350 - 450 I 430 V - 550 V
- max. dodaný výkon: 5 kW
- kapacita: 19,3 kWh



Obr. 2.10: Bateriový pack RESU 10H - 400V lithium-ion storage battery [31]

Další příklad firmy pohybující se na tomto trhu je **Pylon technologies** [32]. Ta nabízí například bateriové bloky US2000B, ze kterých jde sestavit větší battery pack. Dva takovéto spojené bloky jsou na obrázku 2.11.

Základní parametry:

- rozsah napětí: 45 - 54 V
- max. dodaný výkon: 100 A
- kapacita: 50 Ah



Obr. 2.11: Bateriový pack složený ze dvou bloků US2000B společnosti Pylon technologies [32]

3 Systém pro bezpečnost a správu baterií na bázi lithia (BMS)

BMS (Battery management system) se dá popsat jako systém, který se stará o to, aby nedocházelo k překročení přednastavených hodnot limitů hlídaného zařízení. Tedy sleduje důležité provozní parametry a v případě jejich přesáhnutí BMS zasáhne, čímž zajistí bezpečný provoz daného zařízení. Také prodlužuje životnost baterie, protože nedochází k nežádoucím stavům, které by životnost zkracovaly. Nebo k nim alespoň dochází méně.

Mezi hlavní provozní parametry patří elektrické napětí článku U_C , teplota článku T_C a celkový elektrický proud, který se do baterie dodává nebo se z ní odebírá I_{BU} , případně i proud, který náleží pouze jedinému článku I_C (tedy opět dodávaný nebo odebíraný).

Jednou z věcí, kterou musí BMS v případě potřeby udělat, je odpojení bateriového úložiště od zátěže. K tomu dochází, pokud je dosaženo spodní hranice pro napětí U_{min} nebo také při překročení horní hranice odebíraného proudu I_{max} .

Účel BMS se dá obecně rozepsat do bodů:

- získávání a zpracování dat
- pozorování stavu článků
- řízení nabíjení a vybíjení a omezení výkonu článku
- chránění a starání se o bezpečnost bateriového úložiště
- komunikace a předávání dat

3.1 Vzhled soustavy baterie

Li-ion bateriové články spolu s BMS a spínacím relé tvoří hlavní části soustavy, která je schopna odpojit celou baterii, pokud dojde k překročení provozních limitů. Tyto limity tvoří limita nabíjecího proudu (CCL) a limita vybíjecího proudu (DCL), které jsou počítány v BMS a jsou funkcí teploty baterie, stavu nabití (SOC), napětí jednotlivých článků a vnitřního odporu článků. Ostatní okolnosti vedoucí k odpojení baterie mohou být chybami (špatné zapojení, obecná chyba BMS, atd.) [19].

3.2 Popis funkce BMS

Tou nejhlavnější funkcí BMS je pozorování stavu jednotlivých článků zapojených do série tvořících celé úložiště [14].

Do toho tedy spadá měření:

- elektrického napětí článků U_C

- elektrického proudu I_{BU}
- teploty článků T_C
- spínání balančního obvodu
- vydání jasného rozkazu pro odpojení bateriového úložiště od zátěže
- odpojení nabíječky od bateriového úložiště

3.3 Parametry BMS

Balancování

Výskyt balančního obvodu v BMS umožňuje zvýšení množství využitelné energie E_V z teoretického jmenovitého množství, které je uloženo v jednotlivých člancích E_N . Pokud by došlo k tomu, že během nabíjení bude v některém z článků dosaženo maximálního napětí U_{MAX} , balancér se sepne a přebytečná energie se přesune jinam, čímž dojde k plnému nabití všech článků v bateriovém úložišti.

Máme dva základní typy balančních obvodů - *aktivní* a *pasivní*. Ten aktivní přesouvá nadbytečnou energii do méně nabitých článků. Pasivní nadbytečnou energii přeměňuje v teplo [14].

SOH

Stav životnosti (SOH) je míra schopnosti baterie poskytovat specifikovaný výkon. To slouží k posouzení připravenosti nouzového energetického zařízení a také je indikátorem toho, zda je potřeba nějaká údržba.

SOC

Mnohé aplikace vyžadují znalost o stavu nabití (SOC) celé baterie nebo jednotlivých článků v bateriovém řetězci. Tímto se uživateli poskytne informace o zbývající kapacitě baterie a také má díky tomu řídicí obvod optimální kontrolu nad nabíjením zařízení.

Komunikace

Mnohé BMS systémy začleňují také nějakou formu komunikace mezi baterií a nabíjecím nebo testovacím zařízením. Některé odkazují na ostatní systémy, které jsou propojené s baterií kvůli monitorování jejího stavu nebo historie. Komunikační rozhraní potřebujeme i kvůli tomu, aby umožnila uživateli přístup k baterii za účelem úpravy řídicích parametrů BMS nebo pro diagnostiku a testování [18].

3.4 BMS dostupné na trhu

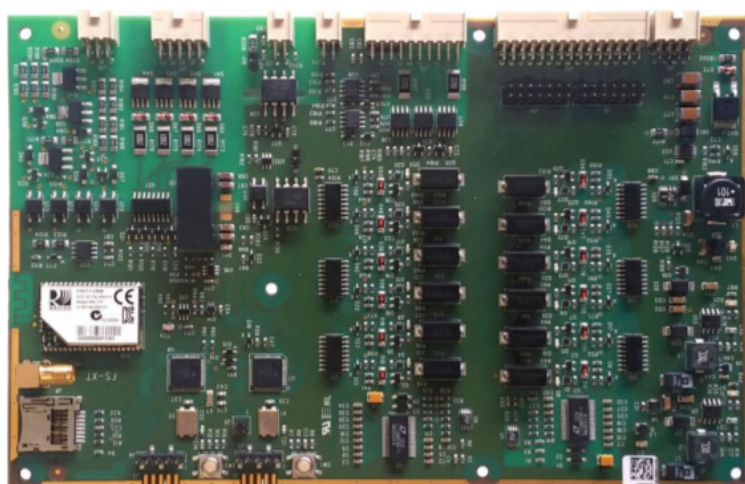
V této podkapitole si shrneme některé systémy, které jsou dostupné na trhu, budeme čerpat z [15].

Dále zmíněné BMS mají podobné parametry i funkci, což znamená:

- tvoří je přibližně 5 - 20 lithiových článků zapojených sériově
- napětí se měří na každém jednom článku
- pasivní balancování proudem je rovno asi 100 mA
- je možná realizace všech možných ochran
- SOC i SOH se dají vypočítat
- je umožněna komunikace s nadřazeným systémem

3.4.1 Freemens Freesafe FS-XT

Jedná se o BMS systém francouzské firmy Freemens, který se používá pro elektrická vozidla, záložní zdroje elektrické energie nebo třeba přenosná elektrická zařízení. Jeden BMS umožňuje připojení baterie, kterou tvoří 5 - 24 článků (zapojených do série, ale je možno i paralelně) až do napětí, které je rovno 840 V. Umožňuje také pasivní balancování výkonem až 2,5 W na článek a obsahuje v sobě všechny druhy ochran.



Obr. 3.1: Freemens Freesafe FS-XT [15]

3.4.2 Orion Jr. BMS

Zde se jedná o americkou firmu Ewert Energy Systems zaměřující se na elektrická vozidla, energetiku a problematiku spojenou s uchováváním elektrické energie. Zmíněný BMS systém je nejmenším BMS systémem, který tato firma nabízí. Zvládá

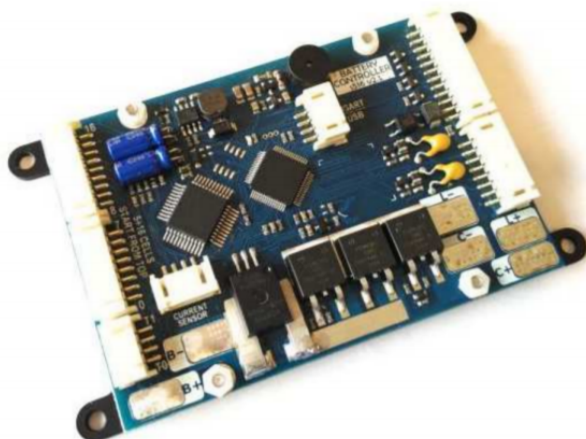
pouze bateriový systém, který tvoří maximálně 16 článků zapojených do série. Obsahuje všechny druhy ochran. Pasivní balancování článků baterie proudem je 150 mA. Obsahuje také SOC i SOH. Co se týče komunikačních rozhraní, vyskytují se zde například CAN Bus nebo RS-232.



Obr. 3.2: Ewert Energy Systems – Orion Jr. BMS [15]

3.4.3 Eneragus Tiny BMS

Firma pocházející z Litvy Eneragus Power Solutions, která se zabývá opět elektrickými vozidly, vytvořila Tiny BMS, který je určen pro baterii o 4 - 16 článcích. I zde jsou součástí všechny potřebné ochrany a umožňuje pasivní balancování článků proudem 100 mA. Odpojování zátěže či nabíječky je zde prováděno přes tranzistory. Co se týče komunikačních rozhraní, použito je zde USB, CAN nebo například Bluetooth. Tento BMS taky obsahuje algoritmus SOC.



Obr. 3.3: Eneragus Power Solutions – Tiny BMS [15]

3.4.4 LiBAL s-BMS

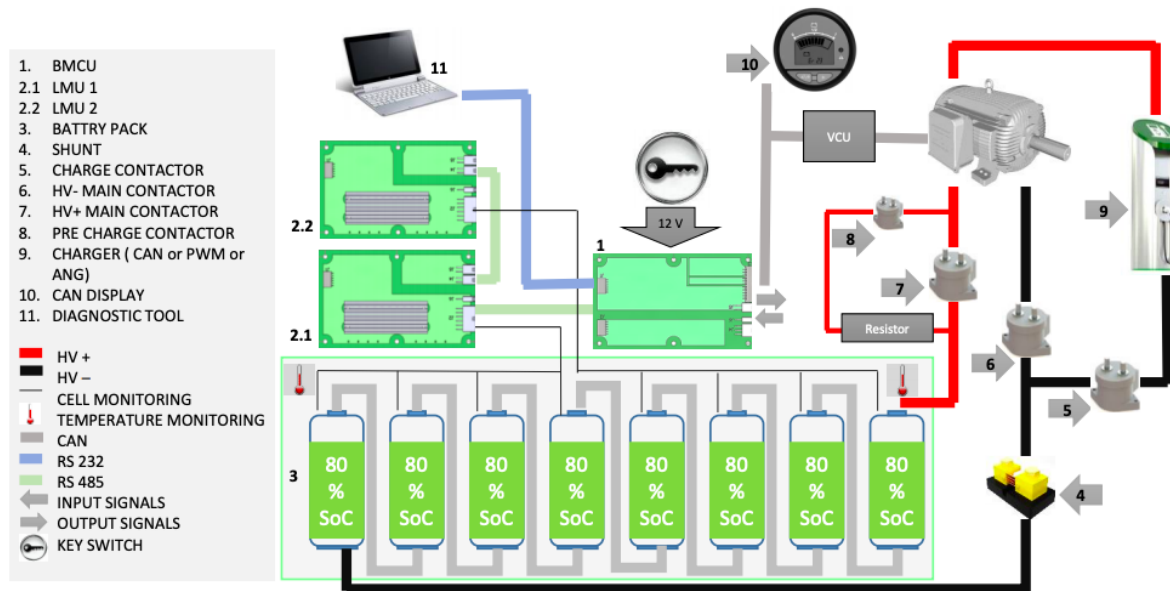
Jedná se o průmyslový BMS, který spravuje dobíjecí lithiové baterie jakéhokoli chemického složení a od libovolného bateriového výrobce. Také umožňuje sestavit veškeré bateriové parametry, jako například mezní napětí a teploty nebo povolené rychlosti nabíjení a vybíjení. Dokáže detekovat 27 chybových režimů a 17 varovných podmínek.

Jednu část celého systému tvoří takzvané LMU (Local Monitoring Units - lokální řídicí jednotky). Tyto jednotky sledují individuální i celkové napětí tří až osmi článků zapojených v sérii a jsou vybaveny dvěma teplotními senzory. Mají poměrně vysoký vyvažovací výkon až 800 mA na buňku. Jendotlivé LMU jsou dále napojeny na BMCU.

Tento BMS obsahuje BMCU (Battery Management Control Unit) - řídicí jednotku baterie, neboli hlavní desku. Ta komunikuje s až 32 LMU s aplikacemi až do 1000 V.

Příklad topologie a funkce tohoto s-BMS pro aplikace nad 60 V je ukázán na obrázku 3.4.

Tento s-BMS (scalable Battery Management System) je možno řídit pomocí licencovaného softwaru s-BMS PRO, který umožňuje integrátoru baterie vytvářet jedinečné bateriové designy a přizpůsobit je specificky pro jejich potřeby [33].



Obr. 3.4: Topologie s-BMS [36]

4 Návrh modulárního akumulčního systému

Cílem druhé části této bakalářské práce bylo vytvořit návrh modulárního akumulčního systému, který vyvíjí firma fgFORTE s.r.o., navrhnout fyzické uspořádání baterií do packů a uspořádání jednotlivých packů do rozvaděče, vytvořit technickou dokumentaci a orientační rozpočet pro sestavení prototypu modulárního akumulčního systému.

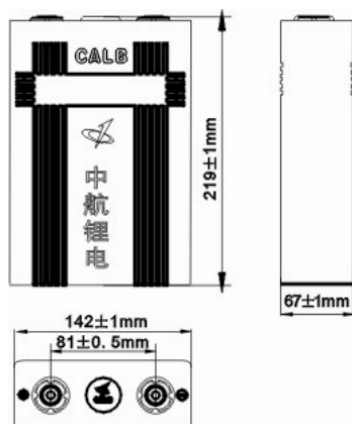
Tento prototyp modulárního akumulčního systému bude obsahovat 160 baterií LiFePO, které mají nominální napětí 3,2 V a jsou zapojeny do série. Kapacita těchto baterií je 100 Ah. Tímto vznikne sériové zapojení 160 baterií o celkovém nominálním napětí 512 V a výkonu až 50 kW.

4.1 Volba článku

Hlavní skladební jednotkou a nejčtenější součástí modulárního akumulčního systému jsou samotné články, které tvoří naprostý základ jeho funkce. Proto je velice důležité vybrat takový článek, který se pro naši aplikaci hodí nejvíce. Z různých druhů lithiových článků, jejichž vlastnosti byly popsány výše byl vybrán článek typu $LiFePO_4$.

Vlastnosti, pro které byl vybrán právě tento typ lithiového článku, jsou především jeho schopnost dodávat velký výkon, jeho poměrně dobrá životnost co se týče počtu cyklů. Dále je taky jeho velkou výhodou lepší tepelná stabilita a díky silnějším chemickým vazbám v materiálech katod ($LiFePO_4$) těchto článků je vhodnější z hlediska bezpečnosti.

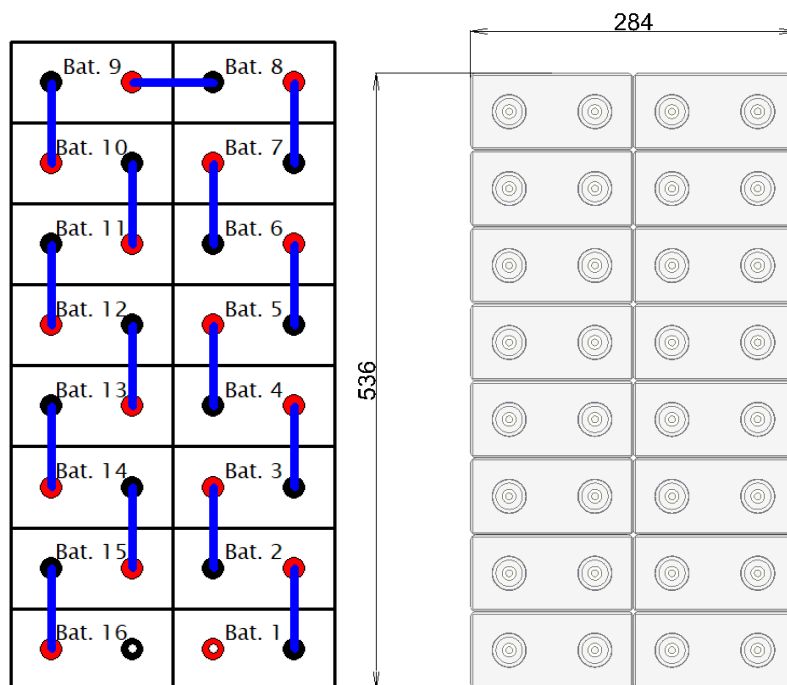
Pro naši aplikaci, byly vybrány články LiFePO - 3,2V - 100 Ah vyráběné společností CALB. Tato baterie má maximální vybíjecí proud až 2 C a maximální nabíjecí proud až 1 C.



Obr. 4.1: Rozměry článku [35]

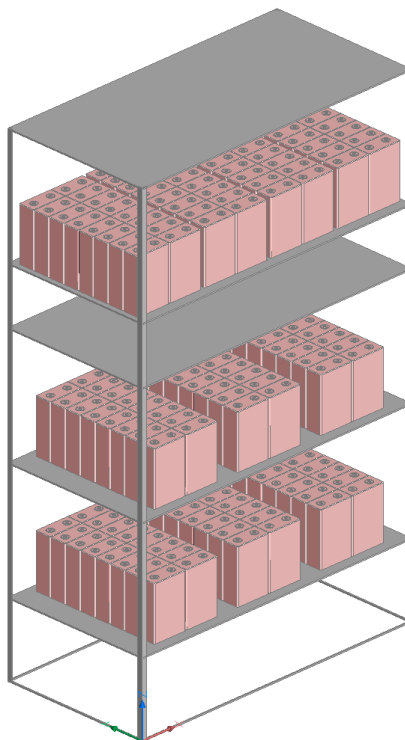
4.2 Návrh fyzického uspořádání baterií do rozvaděče

V modulárním akumulacním systému bude 160 článků, ty budou rozděleny do deseti skupin - tzv. packů. Každý pack bude obsahovat skupinu 16 baterií ve dvou řadách po osmi, jak lze vidět vlevo na obrázku 4.2. Tyto baterie budou propojeny do série měděnými propojkami. Na obrázku 4.2 vpravo jsou zakótovány rozměry packu, ze kterých vychází potřebná velikost rozvaděče a rozmístění v něm.



Obr. 4.2: Zapojení baterií v packu

Samotných deset packů, bude umístěno do rozvaděče, jak lze vidět na obrázku 4.3 a propojeno kabely do série. Ve stojanovém rozvaděči je jedna volná police pro umístění částí systému s-BMS a připevnění rozvaděče s ochrannými a spínacími prvky, řídící s-BMS jednotkou a měřícími prvky.



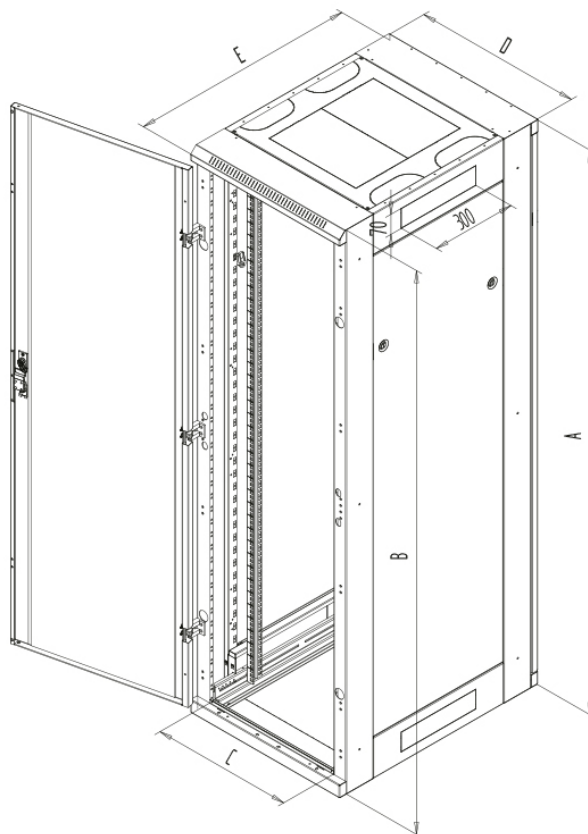
Obr. 4.3: 3D model uložení packu ve stojanovém rozvaděči

4.3 Volba stojanového rozvaděče

Parametr, který byl důležitý při výběru rozvaděče, do kterého bude celý systém sestaven, byl především jeho velikost, která musela odpovídat uspořádání baterií v packu a jejich rozměrům a počtu. Rozměry packu složeného ze šestnácti článků zapojených v sérii lze vidět na obrázku 4.2.

Dalším důležitým parametrem pro výběr rozvaděče byla také nosnost. Jedna baterie váží 3,4 kg, jen samotné články tedy váží přibližně 544 kg.

Pro návrh byl vybrán 19" rozvaděč od firmy Triton s označením RYA-42-A62-CAX-A1. Rozvaděč v tomto provedení má nosnost až 1200 kg, což je zcela dostačující vzhledem k váze baterií, jakožto nejtěžší součásti modulárního akumulárního systému. Hmotnosti ostatních komponent při tak velké nosné rezervě rozvaděče nejsou brány v potaz. Rozměry rozvaděče kótované v obrázku 4.4:



Obr. 4.4: Kótované rozměry stojanového rozvaděče [37]

- $A = 1970 \text{ mm}$
- $B = 1868 \text{ mm}$
- $C = 487 \text{ mm}$
- $D = 600 \text{ mm}$
- $E = 1200 \text{ mm}$

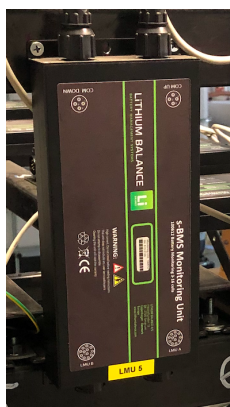
4.4 BMS

Pro náš návrh modulárního akumulčního systému bylo třeba vybrat BMS s jistými parametry. Hlavní parametr je možný rozsah celého BMS systému, tedy kolik článků je možné systémem sledovat a spravovat. Pro aplikaci v našem návrhu byl vybrán s-BMS.

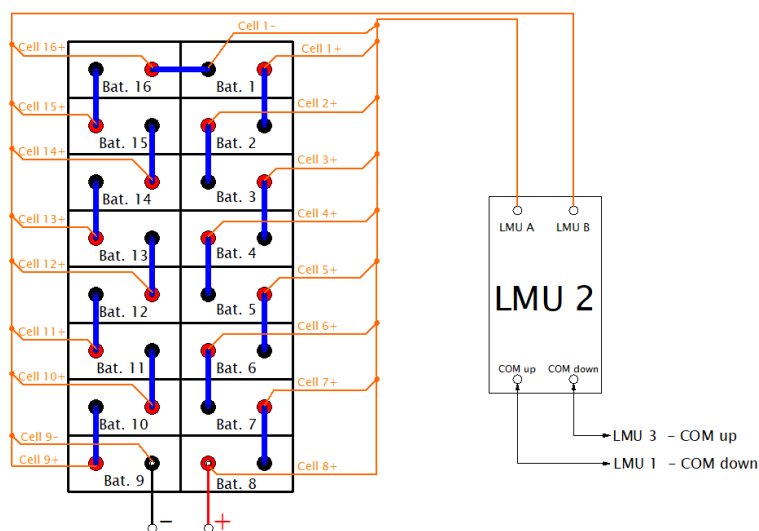
Systém pro bezpečnost a správu baterií (BMS) byl zvolen od firmy LiTHIUM BALANCE, která vyrábí několik řad BMS. Pro naši aplikaci byla vybrána řada s-BMS. Tento typ BMS si lze přizpůsobit podle velikosti systému a konkrétní potřeby.

Tento s-BMS je tvořen sestavou lokálních kontrolních jednotek - LMU a řídicí jednotkou - BMCU. Jak je už výše v teoretické části zmíněno, jedna jednotka BMCU může komunikovat až s 32 LMU, což je pro náš návrh, ve kterém je potřeba 10 LMU, dostačující.

Jednotky s-BMS Monitoring unit v našem návrhu obsahují vstupy pro dvě LMU, každá LMU může sledovat a řídit 3 až 8 článků v sérii, tedy s-BMS Monitoring unit může být napojena až na 16 článků. Jednotka s-BMS Monitoring unit je k vidění na obrázku 4.5. Detail zapojení jednoho bateriového packu k s-BMS Monitoring unit je zobrazeno na obrázku 4.6

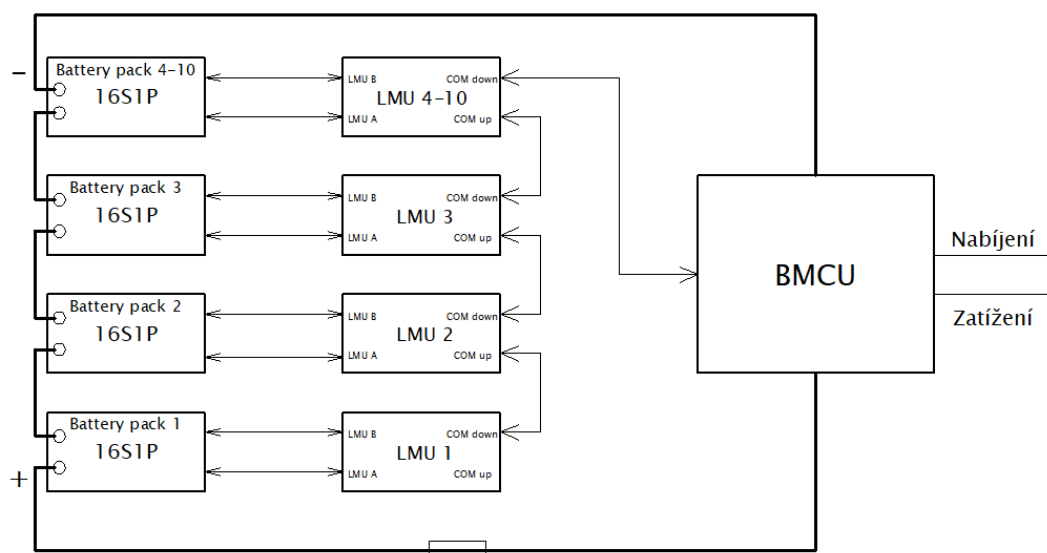


Obr. 4.5: Lokální kontrolní jednotka [34]



Obr. 4.6: Zapojení jednotky s-BMS Monitoring unit

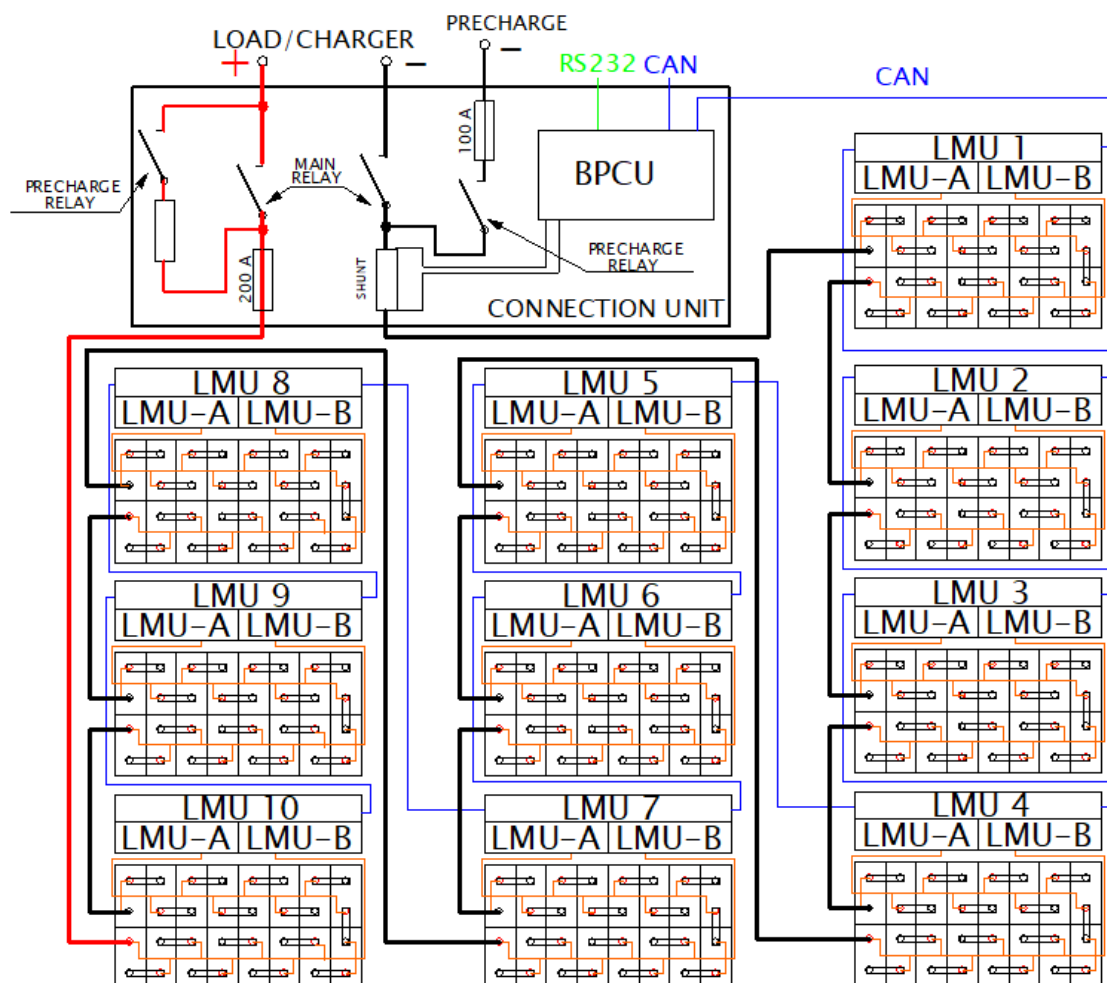
V řídicím rozvaděči je potom umístěna jednotka BMCU která je propojena s jednotkami LMU viz. obrázek 4.7. Tato jednotka BMCU má pak výstup přes rozhraní RS232 a za použití adaptéru USB/RS232 lze propojit s PC.



Obr. 4.7: Koncept zapojení systému s-BMS

Společnost LiBAL poskytuje taky konfigurační software s-BMS PRO, který umožňuje návrháři bateriových systémů nastavit konfiguraci BMS pro jejich konkrétní aplikaci.

4.5 Elektrické schéma



Obr. 4.8: Schéma elektrického zapojení modulárního akumulčního systému

4.6 Rozpočet

Cílem této podkapitoly je udělat finanční rozvahu návrhu prototypu modulárního akumulárního systému a mít tak předběžný přehled o nákladech. V tabulce 4.1 jsou rozepsány položky všech materiálů, nákladů a jejich nacenění. Ceny těchto položek se odvíjí od cen na trhu, kde je spousta výrobců, komponent různých kvalit a je tedy možné, že lze nalézt jednotlivé položky za lepší cenu či za cenu množstevní. Výsledná částka tedy není zcela určující, ale poskytuje nám určitou představu o přibližné ceně tohoto návrhu.

č.:	Položka	množství	cena	celk. částka (Kč)
1.	LiFePO akumulátor 3,2V 100AH CALB	160 ks	3 751 Kč/ks	600 160
2.	BMS kabeláž - Diverse - YSLY-JZ 9x1,5	30 m	65 Kč/m	1 950
3.	Propojky s LMU 12-pin	20 ks	215 Kč/ks	4 300
4.	Pojistka - WKIGBT- 25A- 250A/DC1000V	1 ks	3 200 Kč/ks	3 200
5.	Pojistka - 100FE BUSSMANN	1 ks	428 Kč/ks	428
6.	Relé - KILOVAC - LEV100A4ANG	2 ks	2 590 Kč/ks	5 180
7.	Relé - KILOVAC - EV200HAANA	2 ks	3 130 Kč/ks	6 260
8.	Bočník - DC Anmeter 200A, 50mV	1 ks	860 Kč/ks	860
9.	Rozvaděč - TRITON - RYA-42-A62-CAX-A1	1 ks	20 320 Kč/ks	20 320
10.	Cu propojky	150 ks	159 Kč/ks	23 850
11.	Výstupní konektory - Re- nhotec - 8mm, 200A	2 ks	231 Kč/ks	462
12.	Silová kabeláž - Helukabel - NSGAFÖU 1 x 50 mm ²	10m	320 Kč/m	3 200
13.	s-BMS	1	208 000	208 000
14.	Licence programu s-BMS PRO	1	38 000	38 000
15.	Montáž		5 000	5 000
16.	Ozkoušení		2 000	2 000
17.	Revize		2 000	2 000
Celkové náklady:				925 170 Kč

Tab. 4.1: Rozpočet

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo jednak vytvořit teoretický základ oblasti modulárních akumulčních systémů a jejich jednotlivých prvků a zpracování rešerše v této oblasti. Dále pak na základě těchto teoretických znalostí vytvořit návrh uspořádání modulárního akumulčního systému na bázi lithiových článků, tvorba dokumentace pro sestavení prototypu, volba vhodného BMS pro správu a bezpečnost tohoto systému. Následně pak vytvořit přibližnou kalkulaci nákladů pro navržené řešení.

V první části této práce tedy byla rozebrána teorie akumulčních systémů. Byly uvedeny základní pojmy tohoto tématu, dále byly představeny různé druhy akumulátorů elektrické energie, jejich vývoj, principy jejich funkcí, vlastnosti, konstrukce a způsoby využití. Byly rozvedeny parametry, kterými se na baterie díváme.

Dále jsme se v teorii zaměřili více na články na bázi lithia, neboť navrhovaný akumulční systém pracuje na bázi lithiových článků. Pro získání přehledu v problematice lithiových článků byla zpracována témata jako vlastnosti, výhody i nevýhody článků na bázi lithia a blíže byl popsán princip funkce těchto článků. Důležitou kapitolou pak byla kapitola, která představovala různé druhy lithiových baterií, vlastnosti jednotlivých druhů, jejich výhody a nevýhody. Hlavně na základě této kapitoly pak byl vybrán článek nejlépe vyhovující pro náš pozdější návrh.

Část, která se zabírala skládáním lithiových článků do větších modulů a bateriových systémů započala další problematiku, kterou je správa a bezpečnost lithiových baterií a byly v ní uvedeny příklady bateriových modulů, které nám nabízí trh. Poslední část teoretické části byla věnována systémům pro bezpečnost a správu baterií na bázi lithia, takzvaných BMS. Byla popsána jejich důležitost při používání lithiových baterií. Uvedeny byly jejich funkce a hlavní parametry. Z tohoto teoretického základu pak vzešla volba vhodného BMS pro náš návrh. Nakonec byly ještě představeny některé BMS, které jsou dostupné na trhu.

Po zpracování rešerše a podložení naší práce teorií byl v další části práce řešen praktický návrh modulárního akumulčního systému. Tento systém je vyvíjen firmou fgFORTE s.r.o. a jedná se o systém, který obsahuje 160 baterií a má tak nominální napětí 512 V.

Nejprve byl zvolen lithiový článek vhodný pro navrhovaný systém. Bylo navrženo uspořádání jednotlivých článků do větších celků - packů, a byl zakreslen návrh umístění článků a jejich pospojování v packích. Dále pak na základě rozměrů těchto packů byl sestaven v programu BricsCAD 3D model rozmístění jednotlivých packů v rozvaděči. Z tohoto návrhu pak byl vybrán vhodný rozvaděč od společnosti TRITON PARDUBICE s.r.o s ohledem na rozměry a váhu částí akumulčního systému.

Dále byl zvolen vhodný BMS systém, byly popsány jeho parametry pro naši aplikaci, bylo detailněji zakresleno zapojení LMU jednotky a koncept zapojení celého

s-BMS systému.

V programu ProfiCAD bylo nakresleno schéma elektrického zapojení celého modulárního akumulčního systému.

Poslední část tohoto návrhu byla věnována kalkulaci nákladů pro navržené řešení. Byly vypsány předpokládané položky tohoto návrhu a jejich ceny a vznikl tak přibližný přehled o nákladech vynaložených na sestavení a zprovoznění prototypu modulárního akumulčního systému.

Literatura

- [1] KRATOCHVÍLA, Lukáš. *Systém pro správu Li-ion baterie*. Brno, 2017. Bakalářská práce. VUT FEKT. Vedoucí práce Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.
- [2] WAGNER, Vladimír. *Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie* [online]. 11. 9. 2018 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie>
- [3] MAREŠ, Ing. Jan, prof. Ing. Martin LIBRA, CSc. a Ing. Vladislav POULEK, CSc. *Akumulace elektrické energie*. Elektro. 2011, (2), 6-10.
- [4] MARCONI. *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení aneb letem světem startovacích olověných akumulátorů*. 2008. Dostupné také z: https://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2019/06/Lux_Akumulatory.pdf
- [5] ELECTROCHEM. *Battery Basics, Cell Chemistry, and Cell Design* [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: https://s24.q4cdn.com/142631039/files/doc_presentations/Primary-Battery-Basics-Cell-Chemistry-and-Cell-Design.pdf
- [6] PANCE, Štěpán. *Chladicí okruhy hybridních a elektrických vozidel*. Praha, 2018. Dostupné také z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/77404/F2-BP-2018-Pance-Stepan-BP_Pance_Chladici_okruhy_hybridnich_a_elektrickych_vozidel.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. ČVUT FS. Vedoucí práce Ing. Rastislav Toman.
- [7] *Napětí akumulátoru. Abeceda baterií a akumulátoru* [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy/nap%C4%9Bt%C3%AD+akumul%C3%A1toru>
- [8] FARAHANI, Shanin. *Battery Capacity* [online]. 2008 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/battery-capacity>
- [9] HRZINA, Ph.D., Ing. Pavel. *Cykly a životnost baterie* [online]. 1. 9. 2020 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21096-cykly-a-zivotnost-baterie>
- [10] BU-402: *What Is C-rate? Battery University* [online]. 9. 3. 2017 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/what_is_the_c_rate

- [11] TICHÝ, Ing. Jiří. Lithiové akumulátory: Přehled základních typů a jejich vlastností [online]. 15. 7. 2019 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [12] BU-204: How do Lithium Batteries Work?: Discover why lithium-ion is a superior battery system. Battery University [online]. 1. 6. 2018 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/lithium_based_batteries
- [13] BU-205: Types of Lithium-ion. Battery University [online]. 3. 12. 2020 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [14] IRA, Bc. Lukáš. Návrh a realizace Battery Management Systému trakční baterie. Praha, 2019. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82542/F3-DP-2019-Ira-Lukas-Navrh%20a%20realizace%20Battery%20Management%20Systemu%20trakcni%20baterie> lisAllowed=y. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Skarolek.
- [15] HLADÍK, Bc. Jan. Monitorovací a ochranný systém baterií. Brno, 2018. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=170985. Diplomová práce. VUT FEKT. Vedoucí práce Ing. Jan Knobloch, Ph.D.
- [16] Proč používat LiFePO baterie? [online]. [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://www.abctech.cz/default.asp?show=wmwmpart=articlewmaid=87>
- [17] CETL, Ing. Tomáš. Lithiové akumulátory velkých výkonů a jejich použití [online]. [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/lithiove-akumulatory-velkych-vykonu-a-jejich-pouziti-13384>
- [18] Battery Management Systems (BMS) [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.mpoweruk.com/bms.htm>
- [19] KLUSÁČEK, Jan. BMS SETTINGS ANALYSIS. Brno, 2020.
- [20] JANKULÁR, Bc. Tomáš. Příprava a charakterizace elektrodových materiálů z elementární síry pro Li-ion akumulátory. Brno, 2013. Diplomová práce. VUT FEKT. Vedoucí práce Ing. Ondřej Čech.
- [21] BELZA, Jaroslav. Akumulátory Li-ion a jejich nabíjení. Praktická elektronika [online]. 2. 4. 2001, 2001(4) [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.belza.cz/charge/liion1.htm>

- [22] BU-501a: Discharge Characteristics of Li-ion [online]. 20. 2. 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/discharge_characteristics_li
- [23] BU-501: Basics about Discharging [online]. 9. 8. 2019 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/discharge_methods
- [24] BU-302: Series and Parallel Battery Configurations [online]. 18. 6. 2019 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/serial_and_parallel_battery_configurations
- [25] BU-803a: Cell Matching and Balancing [online]. 2. 4. 2016 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_803a_cell_mismatch_balancing
- [26] MUSIL, Milan. Přípravek pro testování a diagnostiku Li-ion baterií. Brno, 2019. Bakalářská práce. VUT FEKT. Vedoucí práce Ing. Vladimír Levek.
- [27] Structure and reaction formula of batteries [online]. [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: <http://www.baj.or.jp/e/knowledge/structure.html>
- [28] HARRIS, Joshua. Lithium air battery [online]. In: . [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: [http://alpha.chem.umb.edu/chemistry/ch471/documents/Lithium%20Air%20Presentation%](http://alpha.chem.umb.edu/chemistry/ch471/documents/Lithium%20Air%20Presentation%20.pdf)
- [29] BU Summarized: Learn How to Arrange Batteries to Increase Voltage or Gain Higher Capacity [online]. 5. 12. 2017 [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: <https://www.cadex.com/blog/post/bu-summarized-series-and-parallel-battery-configurations>
- [30] High Voltage Lithium-Ion [online]. [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: <https://www.europe-solarstore.com/batteries/battery-voltage/high-voltage-lithium-ion.html>
- [31] LG Chem RESU 10H - 400V lithium-ion storage battery [online]. [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: <https://www.europe-solarstore.com/batteries/battery-voltage/high-voltage-lithium-ion/lg-chem-resu-10h-400v-lithium-ion-storage-battery.html>
- [32] Lithium- Iron Phosphate Battery US2000B Product Manual [online]. In: . [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: <https://www.s-power.cz/wp-content/uploads/pylontech-us2000b-manual.pdf>

- [33] S-BMS. Lithium balance [online]. 2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://lithiumbalance.com/products/s-bms/?fbclid=IwAR2fLH_yeinPzaPrLvUh3niIbab-CbgzlgmHrkgiEmE8Wv62PeUujkcVX0U
- [34] LiBAL s-BMS [online]. In: . Denmark [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: https://lithiumbalance.com/wp-content/uploads/LiBAL-s-BMS-Housed_20181004.pdf
- [35] CALB [online]. In: . China [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: <https://evwest.com/support/CALB-CA100Ah.pdf>
- [36] S-BMS: Product presentation [online]. In: . [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: <https://lithiumbalance.com/wp-content/uploads/LiBAL-s-BMS%E2%84%A2-1.pdf>
- [37] Stojanový rozvaděč RYA [online]. Pardubice, 2020 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: <https://www.triton.cz/cs/datove-rozvadece/stojanove-rozvadece/stojanovy-rozvadec-rya>

Seznam příloh

Příloha A - Rozměry bateriového packu

Příloha B - Uložení packů ve stojanovém rozvaděči

Příloha C - Zapojení baterií v packu

Příloha D - Koncept zapojení s-BMS systému

Příloha E - Schéma elektrického zapojení modulárního akumulárního systému

Příloha F - Zapojení LMU jednotky